



## Energirenovering af typeskolebygning fra 1970-erne

Tommerup, Henrik M.

*Publication date:*  
2010

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Tommerup, H. M. (2010). *Energirenovering af typeskolebygning fra 1970-erne*. DTU Byg, Danmarks Tekniske Universitet. Byg Rapport No. R-224

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Energirenovering af typeskolebygning fra 1970'erne



Henrik Tommerup

## Rapport

Institut for Byggeri og Anlæg  
2010

DTU Byg-Rapport R-224 (DK)  
August 2010

## Forord

Denne rapport om ”Energirenovering af typeskole bygning” er udarbejdet i forbindelse med EUDP2008-I projektet med titlen ”Energirenovering af typiske bygninger – eksempelsamling”. EUDP er energistyrelsens ”Energiteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram”. Projektet er gennemført med økonomisk støtte fra programmet og har journal nr. 63011-0115.

Projektet er udført af Danmarks Tekniske Universitet (DTU Byg) i tæt samarbejde med Teknologisk Institut, Aalborg Universitet, Statens Byggeforskningsinstitut ved Aalborg Universitet samt Cowi A/S. Videninstitutionerne i projektet er identiske med kerneaktørerne i Innovationsnetværket LavEByg og arbejdet i projektet har suppleret arbejdet i netværket og omvendt.

Projektet har haft som formål at udvikle metoder og eksempler vedrørende projektering af energimæssigt vidtgående energirenoveringer (lavenergiklasse 1) for derved at stimulere til energibesparelser og øget anvendelse af vedvarende energi i eksisterende bygninger.

Projektets slutrapportering består af en et katalog over typiske energirenoveringstiltag samt en række rapporter med analyser og forslag til energirenovering af forskellige typiske bygninger:

Energirenovering af typeskole bygning fra 70’erne  
Energirenovering af 70’er parcelhus  
Energirenovering af ældre murermesterhus  
Energirenovering af etageboligejendom  
Energirenovering af kontorbygning

Alle rapporter er frit tilgængelige på:  
<http://www.lavebyg.dk/Aktiviteter/Formidling/Rapporter.aspx>

Den aktuelle rapport omhandler energirenovering af en typisk typeskole bygning fra 70’erne i form af en bygning på Baunebjergskolen i Humlebæk, Fredensborg Kommune.

Følgende personer har deltaget i udarbejdelsen af nærværende rapport:

Rune Vinther Andersen, Center for indeklima og energi, DTU Byg  
Peter Weitzmann, COWI A/S  
Maja Grud Christensen, COWI A/S  
Diana Lauritsen, DTU Byg  
Henrik Tommerup, DTU Byg

COWI A/S har bidraget med økonomiberegninger. Desuden har de studerende Hanne Bebe Madsen og Jakob Ernst Malmqvist i forbindelse med eksamensprojektet ”Energirenovering af skole til lavenerginiiveau” på studieretning bygningsdesign på DTU Byg, bidraget til rapporten med dagslys beregninger og visualisering samt diverse andre illustrationer.

Det aktuelle case er udvalgt med hjælp fra Thomas Rysgaard Jacobsen, Energiansvarlig i Fredensborg Kommune. Johnny Petersen, Teknisk serviceleder på Baunebjergskolen, har bistået med oplysninger om de eksisterende forhold vedr. klimaskærm og installationer mv.

# Indholdsfortegnelse

<b>FORORD.....</b>	<b>1</b>
<b>INDHOLDSFORTEGNELSE.....</b>	<b>2</b>
<b>1 INDLEDNING .....</b>	<b>4</b>
1.1 BAUNEBJERGSKOLEN .....	4
1.2 BYGNING D .....	5
<b>2 DEN EKSISTERENDE BYGNING D .....</b>	<b>9</b>
2.1 KLIMASKÆRMSKONSTRUKTIONER .....	9
2.1.1 Loft- og tag.....	9
2.1.2 Facader og gavle.....	9
2.1.3 Vinduer og døre.....	11
2.1.4 Terrændæk.....	12
2.1.5 Fundament/sokkel .....	12
2.2 INSTALLATIONER.....	12
2.2.1 Ventilation.....	12
2.2.2 Varmeforsyning / gaskedler .....	13
2.2.3 Varmefordelingsanlæg .....	13
2.2.4 Varmt brugsvand .....	14
2.2.5 Belysning.....	15
2.3 DAGSLYSFORHOLD.....	15
2.4 MÅLINGER AF INDEKLIMA .....	16
2.5 ENERGIFORBRUG.....	18
2.5.1 Målte energiforbrug.....	18
2.5.2 Be06 beregning .....	18
<b>3 ANALYSE AF ENERGIRENOVERINGSMULIGHEDER.....</b>	<b>20</b>
3.1 KLIMASKÆRM .....	20
3.1.1 Loft- og tagkonstruktion.....	20
3.1.2 Ydervægge .....	20
3.1.3 Fundamenter.....	21
3.1.4 Vinduer og døre.....	22
3.1.5 Terrændæk.....	22
3.2 INSTALLATIONER.....	23
3.2.1 Varmeforsyning.....	23
3.2.2 Varmefordelingsanlæg .....	23
3.2.3 Varmt brugsvand .....	24
3.2.4 Ventilation.....	24
3.2.5 Belysning.....	25
3.2.6 Solvarme.....	26
3.2.7 Solceller.....	26
3.3 VISUALISERING .....	27
<b>4 FORSLAG TIL ENERGIRENOVERING .....</b>	<b>28</b>
4.1 ENKELTTILTAG.....	28
4.1.1 Definition af tiltag .....	28
4.1.2 Energibesparelser ved enkelttiltag .....	29
4.2 KOMBINATION AF TILTAG.....	31
4.2.1 Overholdelse af BR08 krav til nye huse.....	32

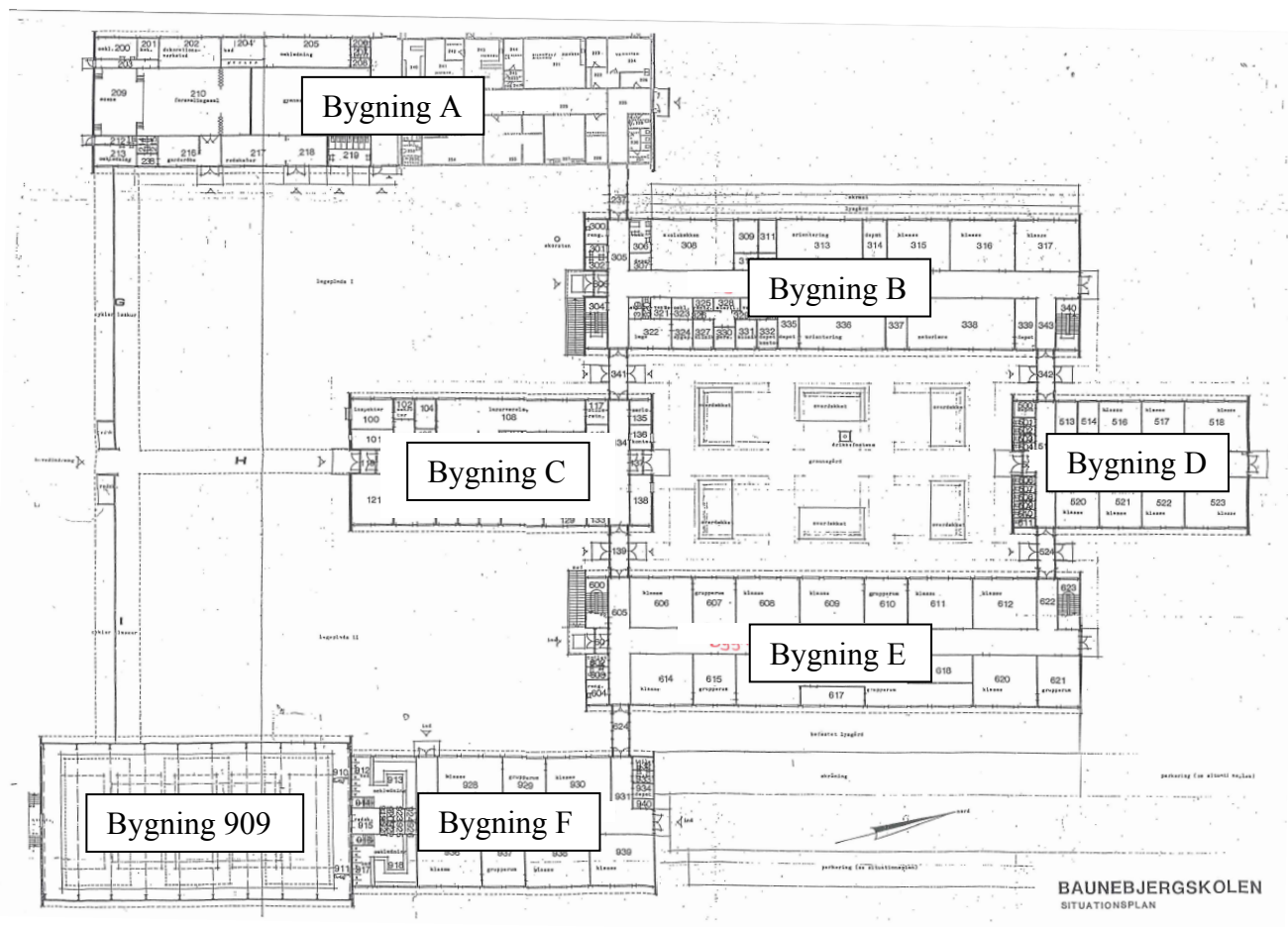
4.2.2	Lavenergiklasse 2 .....	33
4.2.3	Lavenergiklasse 1 .....	34
<b>5</b>	<b>ØKONOMIBEREKNINGER .....</b>	<b>35</b>
5.1	INTRODUKTION .....	35
5.2	BEREGNINGSGANG .....	35
5.2.1	Den simple tilbagebetalingstid .....	35
5.2.2	Rentabilitetsfaktoren .....	35
5.2.3	Energispareprisen .....	36
5.2.4	Energirenoveringsfaktoren .....	36
5.3	BEREGNINGSFORUDSÆTNINGER .....	37
5.3.1	Prissætning .....	37
5.3.2	Teknisk levetid .....	38
5.3.3	Vedligehold .....	38
5.3.4	Energimæssige forhold .....	38
5.3.5	Energipriser .....	38
5.4	PRISSÆTNING AF TILTAG .....	39
5.5	DISKUSSION .....	43
5.6	KONKLUSION .....	44
<b>6</b>	<b>KONKLUSION .....</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCER .....</b>	<b>46</b>

# 1 Indledning

I Danmark er der i dag omkring 1800 folkeskoler med et samlet etageareal på omkring 8 mio. m<sup>2</sup> og et samlet elevtal på 600.000. En betydelig del af disse kvadratmeter er såkaldte typeskoler fra 1960/70'erne. Mange folkeskoler er nedslidte, energiforbruget er stort og indeklimaet er dårligt, hvilket har væsentlig betydning for komfort, sundhed og indlæring. Der er et stort energisparepotentiale og et behov for at vise, hvordan skolebygninger fra 1960/70'erne kan energirenoveres i form af en energimæssig fremtidssikring og samtidig sikring af gode og sunde indeklimaforhold. Der er derfor god grund til at undersøge, hvordan denne type skoler energimæssigt kan opgraderes til BR08, lavenergiklasse 2 eller 1 niveau.

## 1.1 Baunebjergskolen

For at vise mulighederne er der i det følgende taget udgangspunkt i en typisk 70'er folkeskole beliggende i Humlebæk i Fredensborg Kommune. Skolen er primært opført i 1970/1976 i én etage og i form af system-/modulbyggeri i betonelementer. Skolens opvarmede etageareal er jf. BBR på 10.067 m<sup>2</sup>. Figur 1 viser en situationsplan og oversigt over de bygninger, som udgør skolen. Den består af 6 større bygninger, benævnt A, B, C, D, E og F, samt en hal benævnt 909. En mindre og nyere tilbygning (bygning 908) fremgår ikke af figuren. Bygningerne er forbundet via en række mindre forbindelsesbygninger udført med fladt tag og gulv-loft vinduespartier. Bygning A, B, C og D blev som de første opført i 1970, mens de øvrige er bygget til efterfølgende.



Figur 1. Situationsplan med placering og orientering af skolen

En nærmere beskrivelse af de forskellige bygninger fremgår nedenfor:

- Bygning A: Opført 1970 i ét plan uden kælder (1496 m<sup>2</sup>). Anvendes til SFO og gymnastiksal.
- Bygning B: Opført 1970 i ét plan med udnyttet kælder (2622 m<sup>2</sup>). Anvendes til undervisning og skolelæge/tandlæge
- Bygning C: Opført 1970 i ét plan uden kælder (819 m<sup>2</sup>). Anvendes til undervisning og pedelkontor.
- Bygning D: Opført 1970 i ét plan uden kælder (657 m<sup>2</sup>). Anvendes til undervisning.
- Bygning E: Opført 1976 i ét plan med udnyttet kælder (2600 m<sup>2</sup>). Anvendes til folkeskoleundervisning
- Bygning F: Opført 1976 i ét plan uden kælder (790 m<sup>2</sup>). Anvendes til undervisning og omklædningsrum
- Bygning 908: Opført 2002 i ét plan uden kælder (102 m<sup>2</sup>). Anvendes pt. ikke på grund af skader på fundamenter og murværk.
- Bygning 909: Opført 1976 i ét plan uden kælder - hallen (981 m<sup>2</sup>). Anvendes til gymnastik/sport/aftenskole.

Ovenstående arealangivelser er inkl. forbindelsesbygningerne mellem de enkelte bygninger.

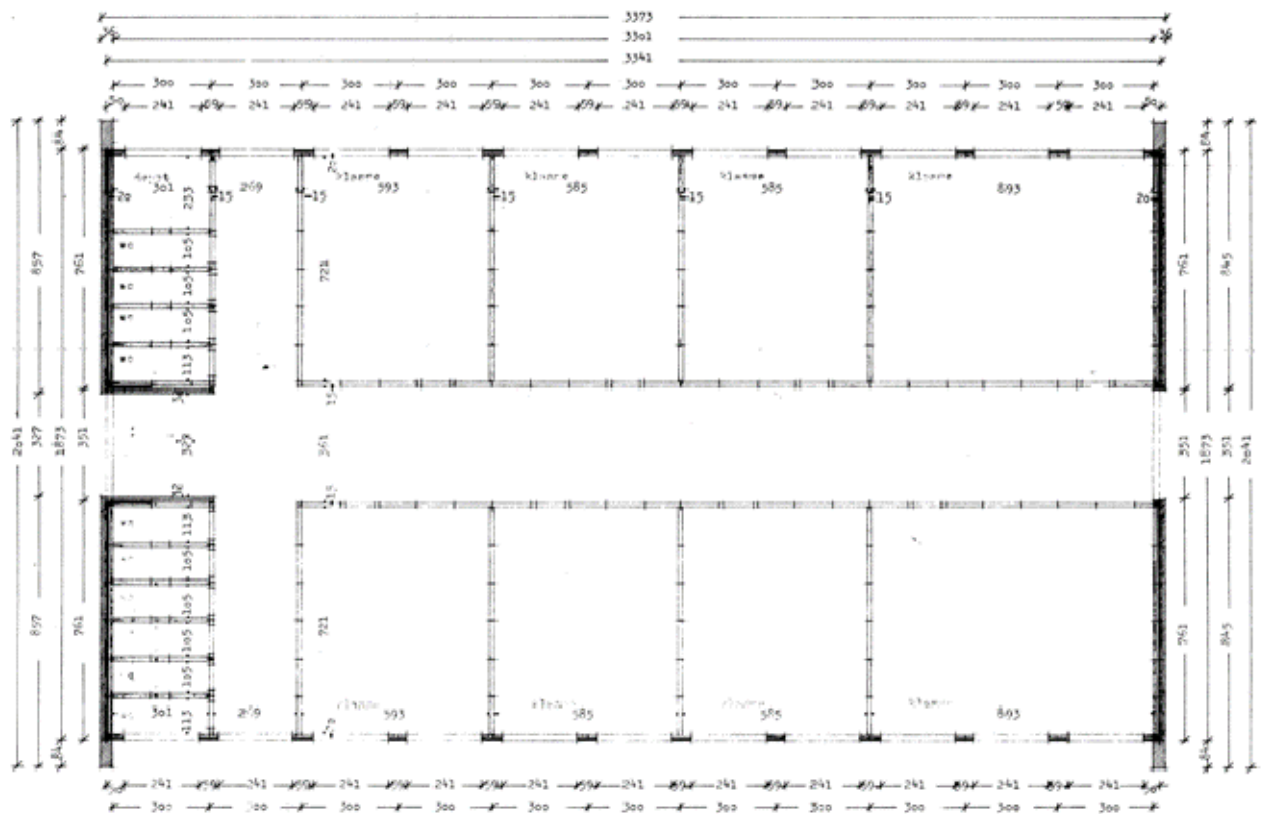
Skolen har ca. 250 elever samt 35 lærere og pædagoger. Uden for normal skoletid bruges skolens faciliteter til diverse andre formål.

Mulighederne for energirenovering undersøges for bygning D, som et repræsentativt udsnit af skolen.

## **1.2 Bygning D**

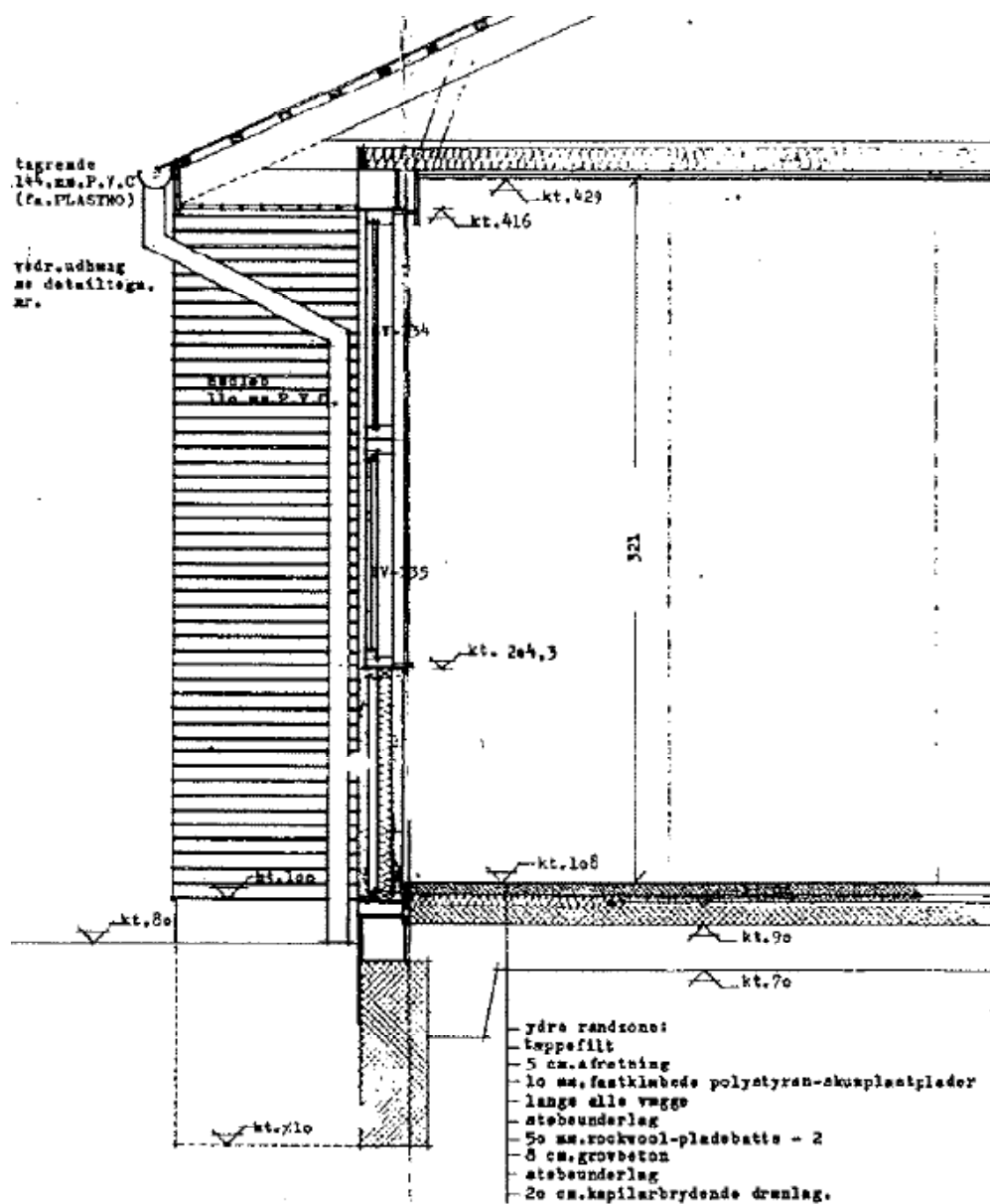
Bygning D er en længebygning på i alt 657 m<sup>2</sup> inkl. forbindelsesbygninger til hhv. bygning B og E. Det opvarmede etageareal uden forbindelsesbygninger udgør 632 m<sup>2</sup>. Bygningen er indrettet med 8 klasselokaler, 4 på hver side af en midtergang og orienteret øst/vest. Mod syd gavlen er der indrettet 10 toiletter og 1 depotrum.

Figur 2-5 viser oprindelig plan, snit, facader og gavle.



Figur 2. Oprindelig (mål)plan af bygning D. Bygningen er bygget op i moduler af 3 m og måler 33,73 x 18,73 m = 631,8 m<sup>2</sup>.





Figur 3. Oprindeligt snit.

Tagkonstruktionen er gitterspærfag med en hældning på 25°. Rumhøjden er 3,2 m og bygningen har et udhæng på ca. 85 cm

Laster fra tagkonstruktionen føres gennem både yder- og indervægge til fundament. De tunge betonindervægge, der opdeler klasselokalerne, sikrer bygningen mod horisontale vindpåvirkninger.



Figur 4. Oprindelige facader og gavle.



Figur 5. Udsnit af vest facade med vinduespartier med oplukkelige vinduer og relativt stort udhæng på ca. 85 cm placeret ved overkarm af vinduer (venstre). Til højre er vist eksempel på sammenbygning med forbindelsesbygning.

Facaden er opbygget af bærende betonelementer med huller til vinduer og døre. I den oprindelige østlige facade er element nr. 2 fra venstre udskiftet med en dør for tilslutning til bygning E, som blev opført lidt senere end bygning D. Bygningens gavle har begge et stort dørparti med indbyggede faste glaspartier.

## 2 Den eksisterende bygning D

I det følgende vil de eksisterende klimaskærmskonstruktioner og installationer blive gennemgået. Der ses bort fra forbindelsesbygninger til bygning B og E.

Gennemgangen baserer sig delvist på energimærkningsrapport udført af Alectia A/S i juli 2009, original byggesagsbeskrivelse fra [www.weblager.dk](http://www.weblager.dk), samt standard for beregning af U-værdier mv. (Dansk Standard 2002).

### 2.1 Klimaskærmskonstruktioner

#### 2.1.1 Loft- og tag

Loft- og tagkonstruktionen er oprindeligt udført af trægitterspær med loft mod koldt uudnyttet tagrum. Taghældningen er 25° og tagbeklædningen er udført af eternitskiffer, men er i forbindelse med en tagrenovering i 2003, er der blevet lagt eternit ”bølgeplader” ovenpå den eksisterende tagbelægning. Loftet består oprindeligt af 100 mm mineraluldsisolering, 1”x4” forskalling pr. 400 mm til fastgørelse af Alukraft og 2x9 mm loftplader af gips. Loftet er senere blevet efterisoleret med 100 mm. Den nuværende isoleringstykkelse er altså på 200 mm.

U-værdi: 0,20 W/m<sup>2</sup>K

Isoleringen er visse steder særdeles mangelfuld eller defekt. Jævnfør energimærkningsrapporten er der for disse områder (20 m<sup>2</sup>) regnet med en U-værdi på 1,65 W/m<sup>2</sup>K.

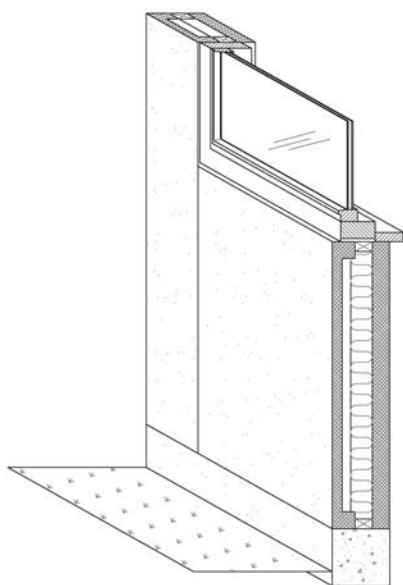
#### 2.1.2 Facader og gavle

Bygningens facader er opbygget af præfabrikerede for- og bagelementer i beton, der på byggepladsen er samlet med isolering til færdige elementer. Moduler under og mellem vinduer gentages for hver 3 m. Ydervæggen er opdelt i elementer, monteret mellem og under vinduerne. Elementerne med en samlet konstruktionstykkelse på 21 cm består af:

60 mm betonelement indvendigt  
60 mm mineraluld ( $\lambda = 0,05$  W/mK, jf. DS418:2002, anneks G)  
50 mm lufthulrum  
40 mm betonelement udvendigt

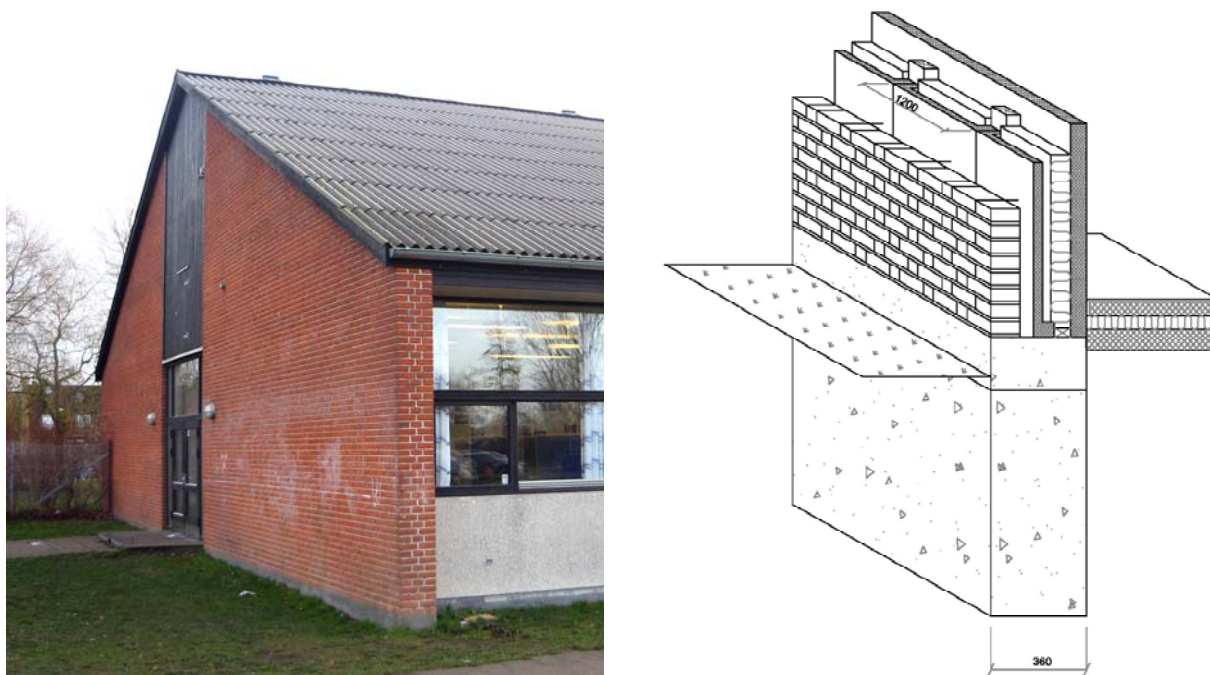
Det udvendige element har ribber i top og bund med ca. den dobbelte tykkelse. Det indvendige og udvendige betonelement er ud for ribberne løst boltet fast via en gennemgående trælægte. Et snit gennem facadeelementer og vinduer fremgår af Figur 6.

U-værdi: 0,65 W/m<sup>2</sup>K.



Figur 6. Snit gennem facadeelementer og vinduer (DTU Byg 2010).

Kommunens arkitekt og ansvarlig for klimaskærmen oplyser at gavlene er opbygget på samme måde som facaderne, i elementer af 1200 mm i bredden, men dog med ”pyntefacader” udenpå i form af 110 mm tegl, monteret med murbindere på betonelementet (se Figur 7). Der antages samme U-værdi som for facaderne.



Figur 7. Nord-gavl på bygning D samt snit (DTU Byg 2010).

Over vinduerne ligger en massiv betonoverligger. Der er ingen indeliggende søjler eller lignende til at overføre kræfter fra taget til fundament, så betonoverliggeren ligger alene af på for- og bagelementet. Dette er baseret på udsagn fra tidligere medarbejder i firmaet Berg Bach & Kjeld Egmose A/S, som var ingeniør på byggeriet.

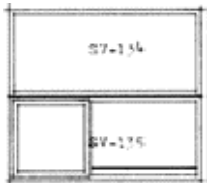
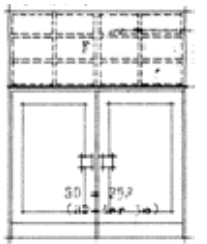
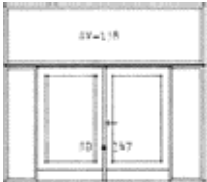

U-værdi for betonoverligger, gennemgående: 3,8 W/m<sup>2</sup>K.

### 2.1.3 Vinduer og døre

Der er trævinduer med 2-lags termoruder fra bygningens opførelse. Enkelte ruder er blevet udskiftet på grund af punktering eller hærværk og lignende. Yderdørene i bygningens gavle er udført med sikkerhedsglas i selve døren og med faste partier med termorude i de faste partier.

Varmetekniske egenskaber fremgår af Tabel 1. Der er almindelige, indvendige, manuelt styrede gardiner i bygningen, svarende til en resulterende solafskærmningsfaktor på 0,80.

Tabel 1. Varmetekniske data for eksisterende vinduer og døre.

		H [m]	B [m]	A [m <sup>2</sup> ]	U <sub>w</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	Glasandel [-]	g <sub>g</sub> [%]	LT [%]
Vinduesparti i facader (SV-134 + SV135)		2,12	2,41	5,1	2,9	0,80	75	81
Dør ved mellemgange med fyldningselement (SD-252)		3,08	2,41	7,4	1,60	0,25	-	-
Hoveddør i nordgavl (SV-138 + SD-147)		3,08	3,51	10,8	2,6/2,8	0,87	75	81
Hoveddør i sydgavl (SV-139 + SD-148)		3,08	3,47	10,7	2,6/2,8	0,87	75	81

### 2.1.4 Terrændæk

Terrændækket er opbygget af (se Figur 8):

Vinyl gulvbelægning.

50 mm afretning

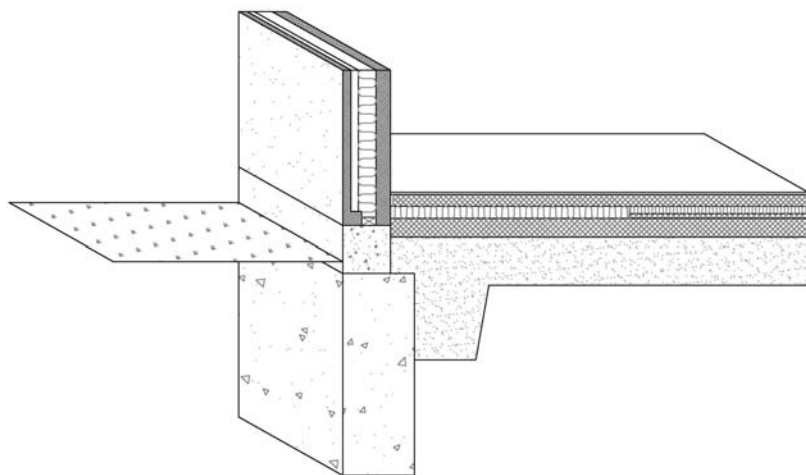
Støbeunderlag

50 mm isolering,  $\lambda = 0,050 \text{ W/mK}$ , jf. (DS418:2002, anneks G)

80 mm grovbeton

200 mm kapillarbrydende drænlag

U-værdi:  $0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



Figur 8. Snit gennem terrændæk og fundament (DTU Byg 2010).

Indervægge er som ydervæggene udført i betonelementer med skillevægsfundamenter i beton, der gennembryder terrændækkets isolering. I henhold til DS418:2002, tabel 6.7.3, udgør linietabet  $2 \times 0,09 = 0,18 \text{ W/mK}$ . Der er i alt ca. 112 m skillevægsfundament. På den baggrund kan beregnes et tillæg til U-værdien på  $0,03 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Den resulterende U-værdi for terrændækket:  $0,36 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

For terrændæk uden gulvvarme kan der regnes med temperaturfaktor b på 0,7.

### 2.1.5 Fundament/sokkel

Fundamenter er udført i beton og støbt til frostfridybde svarende til 90 cm under terræn. Langs terrændækkets kant er der anvendt kuldebroisolering af 10 mm polystyren.

Linietab:  $0,80 \text{ W/mK}$  jf. (Energistyrelsen, 2008, bilag 3.1.10, Lbr. 10.1)

## 2.2 Installationer

### 2.2.1 Ventilation

Undervisningsrummene er naturligt ventileret via luftspjæld under vinduerne og oplukkelige vinduer. Der er antaget en ventilation på  $1,2 \text{ l/s/m}^2$  både vinter og sommer i brugstiden. Der

er antaget en infiltration om vinteren og sommeren udenfor brugstiden på  $0,6 \text{ l/s/m}^2$ . I øvrige rum (toiletter mv.), er der mekanisk udsugning via ældre boksventilator af fabrikat Exhausto BESF 201-4-1. Den antages i brug i 60 % af brugstiden med en luftmængde på  $7,7 \text{ l/s/m}^2$  og elforbrug på  $2 \text{ kJ/m}^3$ . Uden for brugstiden er der regnet med en infiltration på  $0,3 \text{ l/s/m}^2$ . I de resterende 40 % af brugstiden er der antaget samme ventilation som i undervisningsrummene.



Figur 9. Friskluftspjæld i bundkarm på fast vinduesparti i klasselokale - giver træk om vinteren er derfor typisk lukket til, hvilket også gælder de oplukkelige vinduesfelter. Dette bidrager til et dårligt indeklima, herunder høje  $\text{CO}_2$ -koncentrationer (se afsnit 2.4). Disse spjæld er ikke indregnet i vinduernes U-værdi.

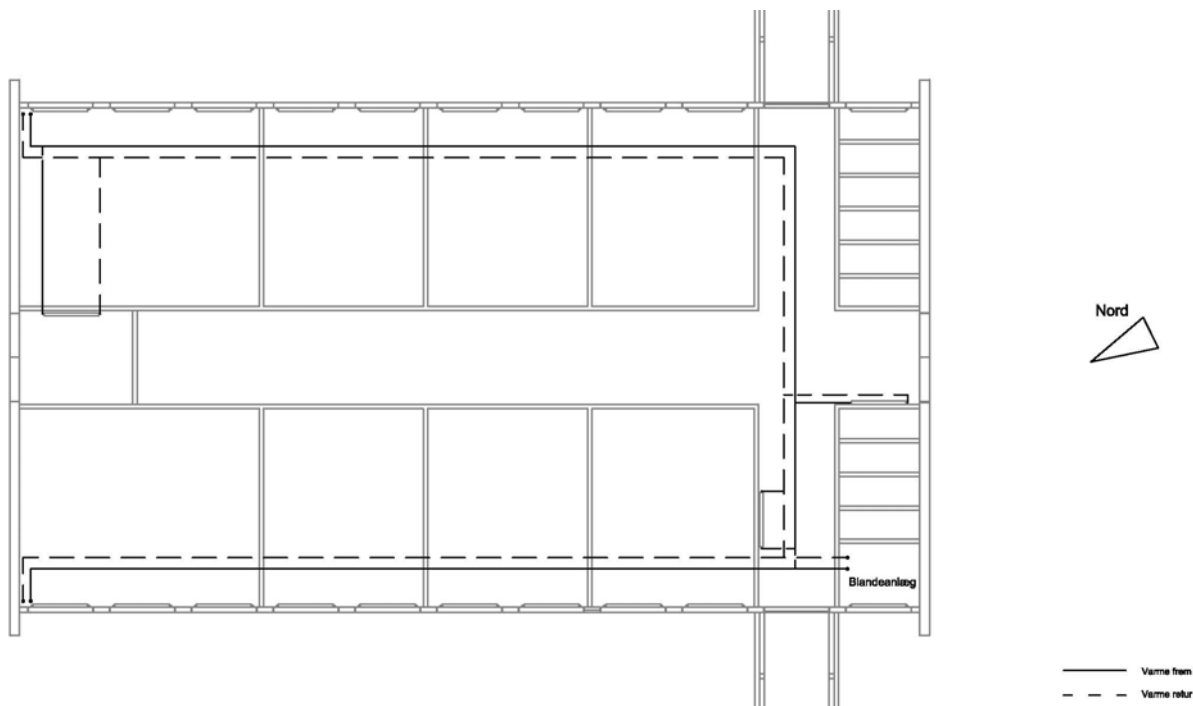
### 2.2.2 Varmeforsyning / gaskedler

Skolen opvarmes med naturgas via to ældre naturgaskedler af fabrikat Tasso (type VH9) på 325 kW nominel effekt, dvs. i alt ca. 650 kW eller ca.  $65 \text{ W/m}^2$  opvarmet etageareal. Kedlerne er placeret i kælderen under bygning B. Da bygning D kun udgør en mindre del af skolen, er det nødvendigt at regne med en mindre kedel og også en mindre brugsvandsbeholder (jf. nedenfor). Der modelleres derfor en kedel med en effekt svarende til den arealvægtede andel (6,5 %) af den samlede effekt. Kedeldata er baseret på data for ældre middelgod kedel, jf. (Energistyrelsen, 2008, bilag 5.5.1).

### 2.2.3 Varmefordelingsanlæg

Varmes fordeles via et vandbåret 2-strengs radiatoranlæg med termostatsstyring og dimensionerende frem- og returløbstemperatur på  $80$  og  $60^\circ\text{C}$ . Varmefordelingsrørene er udført som 2" stålrør med 30 mm isolering, som er ført på loftet ovenpå loftisoleringen, så temperaturfaktoren er 1,0. I Figur 10 er vist en plan over den eksisterende føring af varmfordelingsrør. Længden af rør er ca. 150 m.





Figur 10. Plan over eksisterende føring af varmerør i uopvarmet tagrum (DTU Byg 2010).

Oprindeligt var rørene placeret i bygningen og terrændækket, men på grund af vandskader har man altså i den aktuelle bygning valgt at fremføre rørene på loftet. Der er ikke udetemperatur kompensering på anlægget, men det afbrydes om sommeren. Cirkulationspumpe er en ældre med trinregulering, fabrikat Smedegård EL-VARIO 5-125-4 med maksimal optagen el-effekt på 228 W.

#### 2.2.4 Varmt brugsvand

Der antages et normalt varmtvandsforbruget på  $100 \text{ l/m}^2/\text{år}$  (Be06 standard), hvilket er en del mindre end forbruget oplyst i energimærkningsrapporten.

Varmt brugsvand til bygning A, B, C og D produceres i en ældre 2000 l varmtvandsbeholder af fabrikat AJVA isoleret med 75 mm isolering, svarende til varmetab  $7,3 \text{ W/K}$ . Beholderen er som kedlerne placeret i varmecentralen under bygning B. Beregningsmæssigt håndteres brugsvandsforsyningen ved at der modelleres en beholder med et volumen svarende til den arealvægtede andel (11,7 %) af det samlede beholdervolumen og med varmetab svarende til beholderstørrelsen ( $2,1 \text{ W/K}$ ). Der ses bort fra varmetab fra tilslutningsrør til VVB.

Varme brugsvandsrør og cirkulationsledning til forsyning af toiletterne i bygning D er udført som  $1\frac{1}{4}$ " uisolerede stålrør med varmetab på  $1,82 \text{ W/mK}$ . De er placeret i gangarealerne i terrændækket under isoleringen, svarende til en temperaturfaktoren er 0,6 (Energistyrelsen, 2008, bilag 4.3.8). Længden af rør i bygning D er estimeret til 42 m i alt. Én pumpe sørger for cirkulation af varmt brugsvand til alle skolens bygninger, fabrikat Grundfos UMC 65-60 på 570 W. Fordeles denne effekt på Bygning D efter opvarmet etageareal areal fås en effekt på 37 W. Det antages at pumpen er i drift hele tiden, da bygningen også benyttes efter normal undervisningstid.



### 2.2.5 Belysning

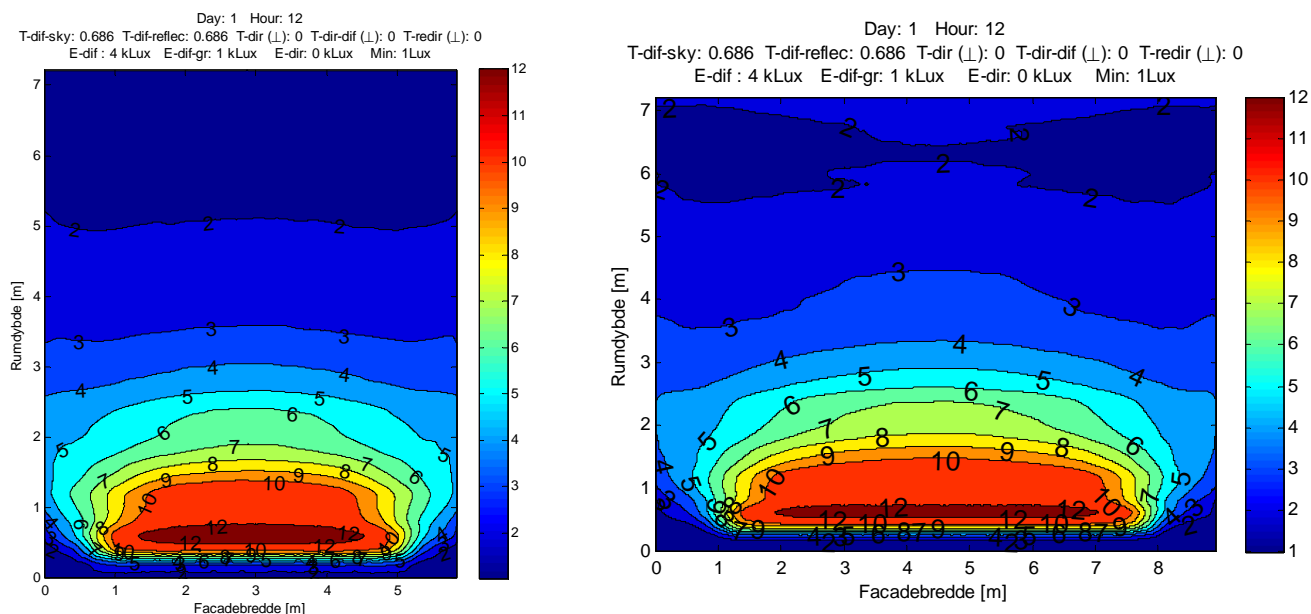
Belysningsarmaturerne er de oprindelige fra bygningens opførelse. Der er tale om manuelt betjente 2-rørs armaturer med konventionelle forkoblinger uden styring med bevægelsesmeldere. Rørene er 120 cm lange og på enten 38 eller 58 W og dertil kommer spolerne på 9 W. På den baggrund og med den aktuelle omfang af armaturer kan beregnes et effektoptag på ca. 15 W/m<sup>2</sup>. I gangarealerne findes der 11 stk nyere armaturer med 3 stk 60 cm rør med effekt på 18 W pr. rør. Belysningen på hvert af de 10 toiletter bruger 120 W. Den gennemsnitlige installerede effekt i gange og på toiletter og depotrum er ca. 10 W/m<sup>2</sup>. I den omtalte energimærkningsrapport bemærkes det at der flere steder i klasselokalerne forekommer et belysningsniveau på 160 lux, hvilket er under minimumskravet på 200 lux.



Figur 11. Belysningsanlæg i 3-modulers klasselokale. Det ses at solafskærmning på vinduerne består af manuelt betjente indvendig gardiner.

### 2.3 Dagslysforhold

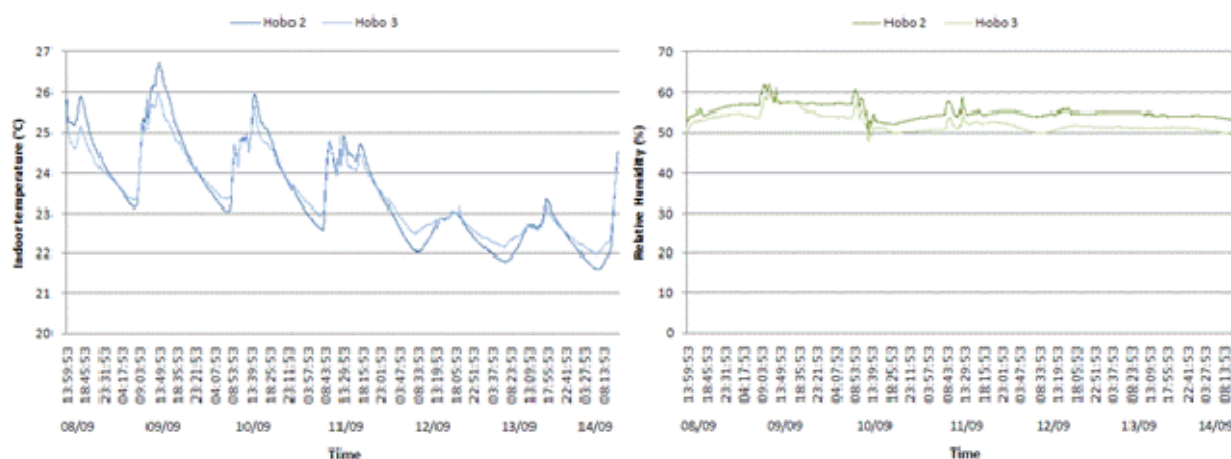
I simuleringsprogrammet LightCalc er der foretaget dagslysberegninger for hver af de to typer klasseværelser i bygning D, hvor forskellen kun er bredden. Beregningerne for både de østvendte og vestvendte klasselokaler viser at der i de smalle klasselokaler er en dagslysfaktor på minimum 2 % i indtil 5 m ind i rummet, mens der i de store klasselokaler er en dagslysfaktor på minimum 2 % indtil 6 m inde i rummet. Det bredde 3-modulers klasselokale med 3 vinduer frem for 2 vinduer formår altså ikke overraskende at give bedre lysforhold bag i rummet.



Figur 12. Dagslysfaktor i henholdsvis smalt og bredt klasselokale (DTU Byg 2010).

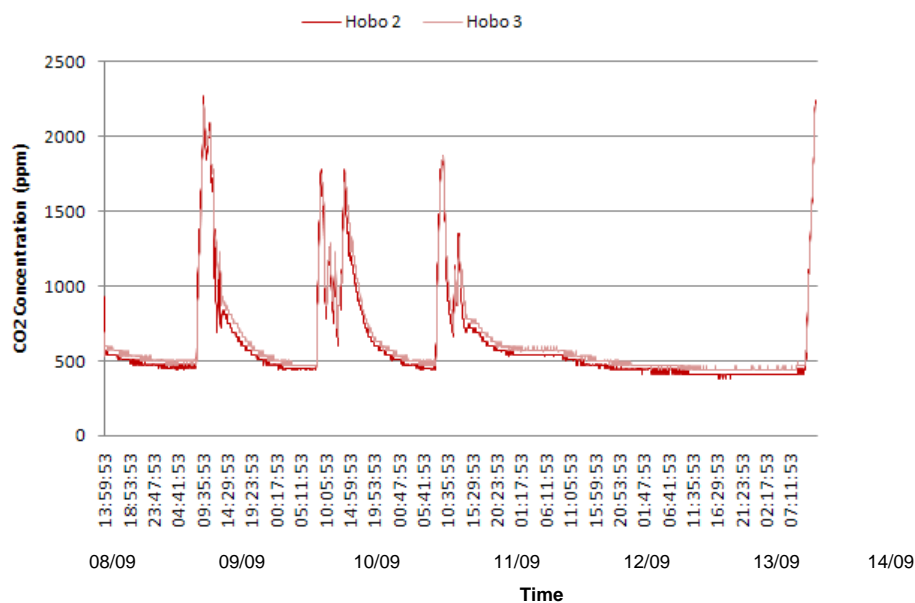
## 2.4 Målinger af indeklima

Der er foretaget indeklimamålinger i et typisk klasselokale anvendt af en 5. Klasse med 18 elever. Målingerne blev udført over 6 dage (tirsdag – mandag) i perioden 8-14 september 2009. Der blev målt på lufttemperatur, luftfugtighed samt CO<sub>2</sub> koncentration i et typisk klasselokale på skolen. Resultater vedrørende temperatur og fugt fremgår af Figur 13. Det ses at temperaturen er 24-26°C i brugstiden, hvilket er over det tilrådelige, jf. (Arbejdstilsynet, AT-vejledning A.1.2 om indeklimate, 2008), idet det anbefales at temperaturen ved let fysisk arbejde holdes mellem 20-22°C og ikke må overstige 25°C. Den relative luftfugtighed ligger mellem 50-60 %, hvor samme vejledning har en anbefaling om den bør ligge mellem 25-60 %. AT's vejledning er baseret på DS474 (norm for specifikation af termisk indeklimate), som bygningsreglementet henviser til.



Figur 13. Resultater af målinger af temperatur (venstre) og relativ luftfugtighed (højre) i typisk klasselokale anvendt af en 5. klasse med 18 elever. Hobo 2 og 3 er to forskellige målepunkter i samme klasselokale.

Figur 14 er vist resultater af CO<sub>2</sub>-målinger. Det ses, at CO<sub>2</sub> koncentrationen øges fra ca. 500 til mellem 1500-2000 ppm, når lokalet er i brug. Arbejdstilsynet anbefaler at koncentrationen ikke overstiger 1000 ppm, og den må ikke overstige 2000 ppm. De ret høje CO<sub>2</sub> niveauer, er en indikation på utilstrækkelig ventilation, og er i tråd med andre undersøgelser, som generelt viser at indeklimaet i danske folkeskoler kunne være meget bedre.



Figur 14. Resultater af CO<sub>2</sub>-målinger i typisk klasselokale anvendt af en 5. klasse med 18 elever.

## 2.5 Energiforbrug

Der redegøres for målte energiforbrug fra [www.tjekskoleforbrug.dk](http://www.tjekskoleforbrug.dk) samt energiberegninger i Be06, hvorefter målinger og beregninger sammenlignes.

### 2.5.1 Målte energiforbrug

På [www.tjekskoleforbrug.dk](http://www.tjekskoleforbrug.dk) er Baunebjergskolen forbrug af hhv. el, vand, varme og CO<sub>2</sub> udledning angivet for sæsonen 2004-2005. Forbruget er opgjort for hele skolen og er altså ikke opdelt på de enkelte bygninger. Det ses af Tabel 2, at skolens korregerede varmeforbrug dengang var 160 kWh/m<sup>2</sup>. I energimærkningsrapporten fra juli 2009 er varmeforbruget i kalenderåret 2008 til sammenligning oplyst til 116.000 m<sup>3</sup> gas (klimakorrigeret), hvilket svarer det til et varmeforbrug på 127 kWh/m<sup>2</sup>, hvis der forudsættes et energiindhold på 11 kWh/m<sup>3</sup>. Elforbruget i samme periode var 233.000 kWh eller 23 kWh/m<sup>2</sup>. Skolen har altså siden 2004/05 formået at spare på energiforbruget på både varme og el. I forhold til danske skole generelt ligger skolen noget over middel på varmeforbruget, men tæt på gennemsnittet på el.

Tabel 2. Energiforbrug for Baunebjergskolen i år 2004/05 (kilde: [www.tjekskoleforbrug.dk](http://www.tjekskoleforbrug.dk)).

Forbrug pr. m <sup>2</sup> 2004-05	El	Varme	Varme (klimakorrigeret)	Vand	CO <sub>2</sub>
	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]
Danske skoler i gennemsnit	24	100	110	0,23	29
Baunebjergskolen	27	140	160	0,14	45

Det skal bemærkes at energibehovet til bygningsdrift for skoler omtrent svarer til det samlede energiforbrug til el og varme, idet belysning også indgår. Baseret på forbrugsdata for 2008 og ved brug af normal sammenvejningsfaktor for el på 2,5, kan der beregnes et målt energiforbrug til bygningsdrift på 185 kWh/m<sup>2</sup>. Dette målte energiforbrug er et gennemsnit for hele skolen og kan ikke direkte sammenlignes med nedenstående Be06-beregningen for bygning D (280 kWh/m<sup>2</sup>). Forhold som brugsmønster i form af en mindre brugstid (der er ikke taget højde for ferieperioder) og et mindre varmt brugsvandsforbrug end forudsat i Be06-beregningen trækker i øvrigt i retning af et større beregnet energibehov end det faktisk målte.

I forbindelse med energimærkningen er der beregnet et gennemsnitligt energibehov på 186,5 kWh/m<sup>2</sup> for hele skolen. Der er anvendt programmet Energy08, som er en simplificeret version af Be06. Energibehovet svarer til energimærke E. Dette harmonerer fint med det målte forbrug i 2008.

### 2.5.2 Be06 beregning

På basis af foregående beskrivelser af klimaskærm og installationer er der foretaget en Be06 beregning af bygning D.

Resultatet af Be06 beregningen er et samlet årligt energibehov på 280 kWh/m<sup>2</sup>/år (se Figur 15). Bruttovarmebehovet (købt varme) er beregnet til 219 kWh/m<sup>2</sup>/år, mens elforbruget til bygningsdrift er 22,9 kWh/m<sup>2</sup>/år.

Nøgletal, kWh/m² år			
Energiramme			
BR:	98.5	Klasse 2:	72.5
		Klasse 1:	51.7
Samlet energibehov		279.6	
Bidrag til energibehovet		Netto behov	
Varme	219.4	Rumopvarmning	115.5
El til bygningsdrift	22.9 *2,5	Varmt brugsvand	51.1
Overtemp. i rum	3.0	Køling	0.0
Udvalgte elbehov		Varmetab fra installationer	
Belysning	19.1	Rumopvarmning	33.3
Opvarmning af rum	0.0	Varmt brugsvand	45.9
Opvarmning af vbv	0.5		
Varmepumpe	0.0	Ydelse fra særlige kilder	
Ventilatorer	0.7	Solvarme	0.0
Pumper	2.4	Varmepumpe	0.0
Køling	0.0	Solceller	0.0
Totalt elforbrug	47.2		

Figur 15. Nøgletal for Be06 beregning over bygning D, som den ser ud i dag.

Be06 beregningen viser et noget større energibehov end det beregnede i Energy08. Dette kan skyldes flere forhold, f.eks. at varmtvandsforbrug er baseret på målinger på 23 l/m²/år i modsætning til 100 liter i Be06. Be06 beregningen er mere generel end Energy08 beregning, idet der i større udstrækning er anvendt standard data for brugstid, varmtvandsforbrug, ventilation mv. Afvigelse skyldes formentligt primært at varmetab fra installationer ikke er inkluderet i samme omfang i Energy08 som i Be06 beregningen.

Energisparepotentialet i forhold til henholdsvis BR08, lavenergiklasse 2 og 1 er:

I forhold til:	BR08	98,5	-65%
	Lavenergiklasse 2	72,5	-74%
	Lavenergiklasse 1	51,7	-81%

### **3 Analyse af energirenoveringsmuligheder**

#### **3.1 Klimaskærm**

##### **3.1.1 Loft- og tagkonstruktion**

Loftet er relativt godt isoleret med 200 mm mineraluld. Isoleringen er dog flere steder mangelfuld og defekt, så det vil det være oplagt at fjerne denne isolering og efterisolere hele loftet til en højisoleret konstruktion med 400 mm isolering. Samtidigt med isoleringsarbejdet, etableres en ny gangbro. Genopretningen af den eksisterende isolering og efterisolering skal ses i sammenhæng med etablering af kanalsystem til et nyt mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding.

På grund af taghældningen kan der ikke etableres den fulde tykkelse ved tagfod. Den gennemsnitlige U-værdi inkl. effekt af afskæringen af isoleringen ved tagfod er beregnet til  $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

##### **3.1.2 Ydervægge**

Ydervæggene er relativt dårligt isoleret svarende til 60 mm mineraluld og U-værdi på 0,65. Det er helt afgørende for at opnå en væsentlig nedbringelse af energibehovet, at der gøres tiltag til at reducere varmetabet gennem ydervæggene. Indvendig efterisolering eller hulrumsisolering er hverken nemt eller varmeteknisk effektivt på grund af et beskedent hulrum og kuldebroer som f.eks. indvendige skilleveje i beton. Den mest sikre og oplagt løsning er at efterisolere udvendigt og derved bremse nedbrydningen af forpladen af beton med frilagte sten, hvor der nogle steder ses at armeringen ruste.

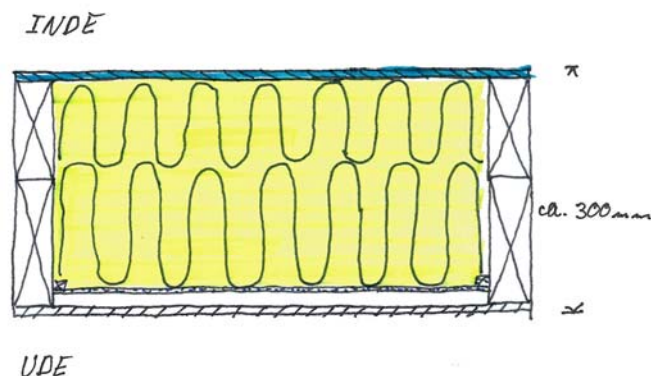
Det var umiddelbart en mulighed at fjerne forpladen og den eksisterende isolering og så efterisolere inkl. ny regnskærm. Men da betonoverliggeren også ligger af på for-elementet - for- og bag-element er tilsammen med til at bære og stabilisere tagkonstruktionen - er det kun muligt at gøre indgreb i de eksisterende facader mellem vinduerne, hvis den erstattes af søjler som understøtning for betonoverliggeren. Der er dog mulighed for at demontere for-elementerne under vinduerne, da de ikke understøtter overliggeren. Både det ene og andet tiltag er dyrt.

Det vil være mere oplagt at anvende højisolerede præfabrikerede lette facadeelementer (eventuelt inkl. integrerede lavenergivinduer) til montering på den eksisterende konstruktion, båret enten ved jord eller ophængt i den eksisterende konstruktion eller eventuelt tagspær. Regnskærmen kan passende udføres som en ventileret løsning med en robust beklædning. Gavlene er opbygget af de samme betonelementer som facaderne, dog 'pyntet' med en teglstensmur, hvilket gør det muligt at fjerne skalmuren og derefter foretage efterisolering efter samme principper som ved facaderne. Fordelen ved at fjerne den eksisterende skalmur er at efterisoleringen påmonteres den bærende del af konstruktionen. For at opretholde den arkitektoniske sammenhæng med de resterende bygninger, bør der genetableres en skalmur, som kræver et fundament.

Der er tale om modulbyggeri, så de enkelte ikke bærende vægelementer har samme dimensioner, og kan fremstilles rationelt og præcist på mål på fabrik eller værksted. Herved undgås indbygning af fugt i de nye vægelementer, så levetiden vil være høj og eventuelle problemer med skimmelsvamp ikke siden opstår. Facaderenoveringen kan på grund af det

store udhæng på 85 cm foretages uden der er behov for at tilpasse taget og ved brug af traditionelle isoleringstykkelser. Det vil være relevant at efterisolere til et fremtidssikret U-værdi på 0,15 eller derunder.

I Figur 16 er vist et eksempel på en principskitse af et nyt vægelement med 250 mm mineraluld i træskelet og center U-værdi på 0,14. Elementet får en samlet tykkelse på ca. 300 mm. Den resulterende U-værdi for de efterisolerede ydervægge vil være ca. 0,15, når der tages højde for kuldebroer (gennemgående træribber) og isolansen af den eksisterende ydervæg. Elementer med delt skelet eller andre tiltag til reduktion af kuldebroeffekten vil kunne reducere U-værdi for samme isoleringstykkelse.



Figur 16. Principskitse af et nyt vægelement med mineraluld men opbygningen (fra ude til inde): Træstolper 50 x 290 mm, ca. 10 mm udvendig beklædning, 25 mm ventilationshulrum, 4 mm hård masonit, 250 mm mineraluld, dampspærre og ca. 15 mm indvendig beklædning. Center U-værdi,  $U_c = 0,14 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Resulterende U-værdi efter renovering: ca. 0,15 (før: 0,65).

Det antages at vinduerne placeres ud for isoleringen i elementerne, hvorved linietafet i samlingen omkring vinduer kan negligeres.

Der regnes med ændrede skyggeforhold som følge af den udvendige efterisolering og fremrykning af vinduer og døre i facaden (30 cm), idet vinklen til udhænget reduceres fra ca. 40 til 27°. Dette har positiv effekt på dagslyset og solenergitilskud.

### 3.1.3 Fundamenter

Fundamenterne trænger generelt til en oppudsning for at sikre mod yderligere skader i forhold til de nuværende afskalninger mv. Derfor bør de renoveres med samtidig udvendig efterisolering (til minimum 45 cm under terræn) for at reducere det betydelige fundamentslinietaf.

Derved kan linietafet reduceres fra 0,8 til ca. 0,3 W/mK (Tommerup, Svendsen 2008)

Yderligere reduktion af linietafet er svært på grund af varmemstrømmen (kuldebroen) via bagvæg og betondækplade og det oprindelige betonfundament. Linietafet kan reduceres hvis terrændækket efterisoleres.

### 3.1.4 Vinduer og døre

Vinduer de oprindelige fra bygningens opførelse i 1970 og med funktion og ydeevne, der ikke er tidssvarende. Det vil være oplagt at skifte til lavenergivinduer i forbindelse med samtidig facaderenovering med efterisolering af ydervæggene, så de nye vinduer kan indbygges optimalt. En mulig løsning var vinduer med velisolerede og smalle ramme-karm profiler og optimerede 3-lags energiruder. Udskiftning af vinduerne vil resultere i mindre energiforbrug, men også færre kulde- og trækgener om vinteren. En alternativ løsning var at udskifte vinduerne til almindelige energivinduer, der opfylder minimumskraverne i BR 2010 ( $E_{ref} > -33 \text{ kWh/m}^2\text{K}$ ).

Der undersøges således to typer vinduer med forskellige rudeløsninger til de øst/vestvendte facader:

- Alm. energivinduer med 2-lags energirude og høj lystransmittans:  $U/LT/g = 1,1 / 80 / 61$ , og med gennemsnitlig  $U_w = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  og  $g_w = 0,49$  og energitilskud  $E_{ref} = -30 \text{ kWh/m}^2\text{år}$ .
- Lavenergivinduer med 3-lags energirude og høj lystransmittans:  $U/LT/g = 0,6 / 71 / 52$ , og med en gennemsnitlig  $U_w = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$  og  $g_w = 0,42$  og energitilskud  $E_{ref} = 10 \text{ kWh/m}^2\text{år}$ .

Der er antaget samme glasandel som for eksisterende vinduer (80 %).

Der forudsættes udskiftning af døre til samme energimæssige niveau som vinduer.

Ved anvendelse af naturlig ventilation anbefales det, at der etableres højtplacerede vinduer i facaderne med automatisk styring. De højsiddende vinduer anbefales at have en vindueshøjde på omkring 40-50 cm.

### 3.1.5 Terrændæk

Ophugning af det eksisterende gulv og udgravning og udførelse af en højisoleret konstruktion, eventuelt med gulvvarme, er ikke et realistisk energibesparende tiltag medmindre det af andre årsager (f.eks. sprængte vandrør) er nødvendigt at genetablere terrændæk konstruktionen.

Rumhøjden på 3,2 meter tillader en indvendig efterisolering af terrændækket. Dette kunne ske ved at etablere et nyt let gulv med 30 mm vakuum isolering og gulvvarme, som erstatning for det uslidte radiatoranlæg, hvilket ville give en pæn energibesparelse og et helt andet og bedre indeklima. "Byggehøjden" for et sådant gulv vil være under 10 cm.

Det nye gulv vil bidrage med en isolans på ca.  $5 \text{ m}^2\text{K/W}$ , hvilket resulterer i en U-værdi på ca. 0.12 for den efterisolerede konstruktion. Dette svarer til kravet til terrændæk konstruktioner med gulvvarme i nye huse.

Hvis kun terrændækket efterisoleres (indvendigt), kan linietabet reduceres til ca.  $0,50 \text{ W/mK}$ . Hvis også ydervægge og fundamenter efterisoleres, kan linietabet reduceres fra  $0,30$  til ca.  $0,20 \text{ W/mK}$ , hvilket dog også kræver tiltag udvendigt på fundamentet i form af isolering til underkant fundament og eventuelt 1 m vandret ud. På grund af gulvvarmen øges temperaturfaktoren for terrændækket fra  $0,7$  til  $1,0$  og for ydervægsfundamenterne fra  $1,0$  til  $1,3$ .





Figur 17. Vakuum isolering til gulv. Her uden gulvvarmeslanger.

## 3.2 Installationer

### 3.2.1 Varmeforsyning

Fredensborg kommune er i gang med at undersøge mulighederne for at blive tilkoblet fjernvarmenettet, og således udfase gaskedlerne. Med baggrund i dette bør der i forbindelse med en renovering tages højde for dette, så kedlerne ikke udskiftes, hvis der senere bliver mulighed for at konvertere til fjernvarme. En eventuel tilkobling til fjernvarmenettet, vil udgøre en fremtidssikring i forhold til i dag hvor gas er en begrænset ressource. Der er regnet med installation af en isoleret fjernvarmeveksler (pladeveksler) med et varmetab på 5 W/K.

Et alternativ til fjernvarme er at udskifte de to ældre gaskedler til én ny og energieffektiv kondenserende kedel. Kedeldata baseres på data for ”nyere kondenserende kedel”, jf. (Energistyrelsen, 2008, bilag 5.5.1).

### 3.2.2 Varmefordelingsanlæg

Varmeanlægget er fra opførelsen af bygningen og jævnligt kan der konstateres lækager fra utætte radiatorer. Det foreslås derfor at varmeanlægget udskiftes til nyt tostrengt radiatoranlæg tilpasset et væsentligt reduceret varmebehov samt med rørføring indenfor klimaskærmen. Som omtalt under ”terrændæk” er det muligt at etablere gulvvarme i forbindelse med en indvendig efterisolering.

Det vil generelt være relevant at etablere lavtemperaturdrift med følgende dimensionerende frem- og returløbstemperaturer:

(Eksisterende ældre gaskedel og tostrengt radiatoranlæg: 80/60°C)

Kondenserende gaskedel og radiatoranlæg: 55/40°C

Fjernvarme og radiatoranlæg: 70/40°C

Gas eller fjernvarme med gulvvarme: 35/30°C

Det foreslås også at udskifte cirkulationspumpen til en automatisk regulerbar sparepumpe med nominel eleffektoptag på 85 W og reduktionsfaktor på 0,4, jf. (Energistyrelsen, 2008, bilag 5.4.7)

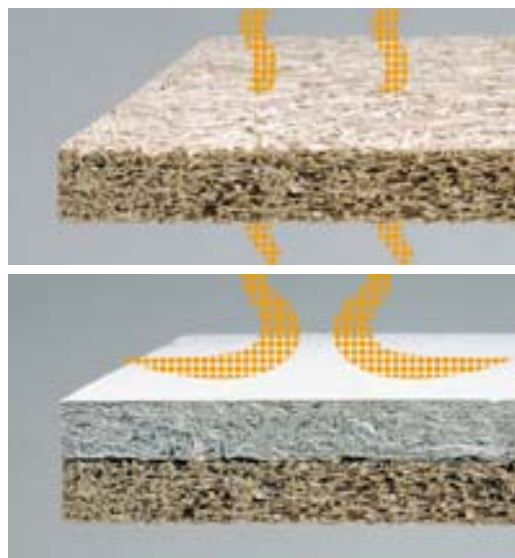
### 3.2.3 Varmt brugsvand

Varmt brugsvand cirkuleres i uisolerede rør placeret under terrændækkets isolering, hvilket bidrager til et meget stort varmetab. Der er flere eksempler på utætte rør og problemer med at de opvarmer de kolde vandrør, der ligger samme sted. Det foreslå derfor at der etableres nye isolerede varmtvandsrør indenfor klimaskærmen.

### 3.2.4 Ventilation

Bygningen er overvejende naturligt ventileret via luftspjæld og det giver ikke umiddelbart et tilstrækkeligt luftskifte i brugstiden, hvilket de omtalte indeklimate målinger indikerede. Der kan opnås en betydelig forbedring af indeklimaet og nedsættelse af energibehovet ved installation af komfortventilation i form af et balanceret mekanisk ventilationsanlæg med effektiv varmegenvinding og lavt tryktab og elforbrug. Den mekaniske ventilationsløsning kan suppleres med naturlig ventilation til køling og ventilation i sommerperioden, så kanaler m.m. kun skal transportere den nødvendige udeluftmængde (mindre dimensioner og energibesparelse).

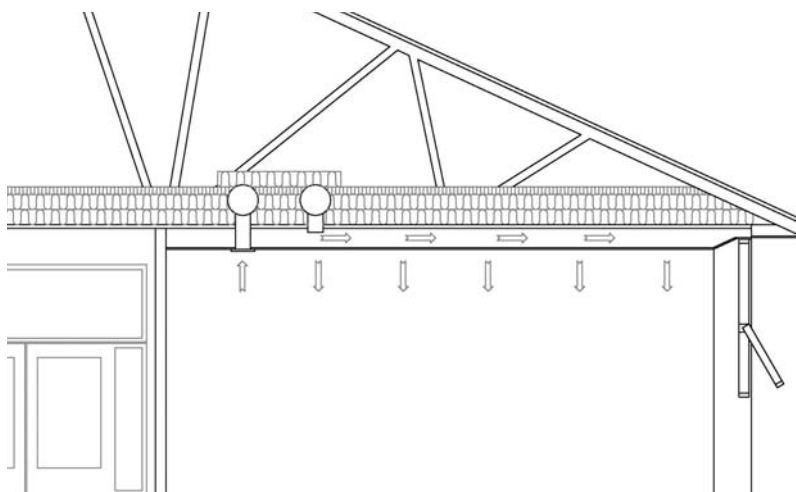
Godt indeklima og lavt elforbrug kan opnås ved blandt andet at anvende særlige akustiklofter med integreret ventilation, som samtidig giver indblæsning af frisk luft uden trækgener. Systemløsningen består af lydabsorberende træbetonplader, der er udviklet specielt til komfortventilation i skoler, institutioner og kontorer. Løsningen leder frisk luft ind i rummet via en større flade end ved almindelige ventilationskanaler, hvilket mindsker elforbruget til lufttransport. Man slipper for synlige ventilationsrør og opnår en løsning uden træk. Systemet er baseret på lavimpulsindblæsning gennem et ventilationsloft med hulrum og opbygget af aktive og passive ventilationsplader, se Figur 18.



Figur 18. Komfortventilation med systemløsning baseret på en nedhængt loftsflade med aktive og passive ventilationsplader. Billedet til venstre er fra Lisbjerg skole i Århus.

Hulrummet skal være minimum 150 mm af hensyn til luftfordeling og vedligeholdelse. Det antages at kanalsystemet indbygges i loftisoleringen eller på anden måde etableres, så varmetabet fra kanalsystemet bliver minimalt og dermed kan negligeres. I Figur 19 er vist et

snit igennem det nedhængte loft, der skaber et trykkammer, som får luften til at strømme igennem de aktive loftplader til rummet.



Figur 19. Snit igennem nedhængt loft i klasselokale med affasning ved vinduerne (DTU Byg 2010).

Der bør vælges ventilationsaggregater med høj varmegenvindingsgrad. For typiske aggregater med modstrømsveksler kan der regnes med 85 %. Der bør også vælges aggregater med lavenergiventilatorer. Samlet set kan der sikres et lavt elforbrug ved at udforme kanalsystem inkl. indblæsning og udsugning med lavt tryktab (jf. f.eks. systemet ovenfor). Der antages et elforbrug svarende til en SEL-værdi på  $1,0 \text{ kJ/m}^3$ .

Der er regnet med et luftskifte på  $1,8 \text{ l/s/m}^2$  hele året i brugstiden. Der er regnet med supplerende naturlig ventilation til køling og ventilation i sommerperioden i brugstiden svarende til en udeluftmængde på  $2,4 \text{ l/s/m}^2$ . Dette er baseret på data for standard ventilationsanlæg til undervisningslokaler (EBST/Energistyrelsen 2009).

Det er vigtigt med en god tæthed af klimaskærmen, så det meste af luftskiftet går gennem varmeveksleren. Det antages derfor, at bygningen i forbindelse med renoveringen tættes til et niveau svarende til et luftskifte på  $1 \text{ l/s/m}^2$  ved et almindelig trykprøvning på 50 Pa (minimumskravet til nye bygninger er  $1,5 \text{ l/s/m}^2$ ), som kan konverteres en infiltration på  $0,10 \text{ l/s/m}^2$  i brugstiden og  $0,06 \text{ l/s/m}^2$  udenfor brugstiden.

### 3.2.5 Belysning

I følge Elsparefonden er belysningens andel af det samlede elforbrug omkring 50 % i typiske skoler som Baunebjergskolen. Så der er et stort energisparepotentiale ved at udskifte den eksisterende belysning til et tidssvarende belysningsanlæg, som bør installeres med bevægelsessensorer og dagslysstyring. Dette vil sikre det korrekte belysningsniveau og samtidigt at lyset tændes og slukkes automatisk efter behov med deraf følgende mindre elforbrug. Der foreslås installeret et nyt "state-of-the-art" belysningsanlæg til undervisningslokaler med en installeret el-effekt til almen belysning i brugstiden på  $6 \text{ W/m}^2$  –

jævnfør liste over belysningssystemer på Elsparefondens hjemmeside. Det eksisterende anlæg har en effekt på  $15 \text{ W/m}^2$ . For gangarealer forudsættes et belysningsanlæg med en installeret effekt på  $4 \text{ W/m}^2$ .

### 3.2.6 Solvarme

Et solvarmeanlæg til varmt brugsvand bør overvejes, og derfor undersøges standard anlæg, jf. (Energistyrelsen, 2008, bilag 5.5.3). Inddata til Be06 fremgår af Figur 20. De oplyste standard data er for et  $6 \text{ m}^2$  anlæg kun til varmt brugsvand til forsyning af  $500 \text{ m}^2$  institution, svarende meget godt til bygning D. For brugsvandsanlæg er en dimensionerings-tommelfingerreglen  $1 \text{ m}^2$  solfanger pr.  $10 \text{ m}^3$  varmt brugsvand pr. år. Dette harmonerer fint med det forudsatte varmtvandsforbrug på  $100 \text{ l/m}^2/\text{år}$  eller  $63 \text{ m}^3$  pr. år. Der er forudsat en optimal placering og hældning af solfangeren på nærliggende forbindelsesbygning med fladt tag.

Figur 20. Be06 inddata for solvarmeanlæg til brugsvand.

### 3.2.7 Solceller

Solceller er en relativ ny teknologi med stort udviklingspotentiale, men som har en energisparepris som typisk er noget større end energiprisen, hvor det bedre kan betale sig at forsyne med el fra det offentlige net frem for producere det på bygningen. Men solceller er en mulighed for komme ned på et ønsket meget lavt energibehov.

Som for solvarme undersøges et standard anlæg på  $100 \text{ m}^2$ , jf. (Energistyrelsen, 2008, bilag 5.5.4). Inddata til Be06 fremgår af Figur 21. Det antages at de  $100 \text{ m}^2$  solcellepanelerne integreres i bygningens vestlige tagflade, og med en relativ dårlig ventilering af bagsiden. Derfor den lave systemvirkningsgrad  $R_p$ . Anlægget vil optage ca. 30% af tagfladens areal. Der er regnet med en "Peak Power (RS)" på  $0,1 \text{ kW/m}^2$  (ydelsen ved solindstråling på  $1000 \text{ W/m}^2$  vinkelret på panelerne). Der er altså regnet med anlæg med  $10 \text{ kW}$  installeret effekt.

Beskrivelse

**Solceller**

<input type="text" value="100"/>	Panel areal, m <sup>2</sup>
<input type="text" value="v"/>	Orientering, N, NØ, Ø, ...
<input type="text" value="25"/>	Hældning, °, 0, 10, 20, 30, ...
<input type="text" value="10"/>	Horisont afskæring, °
<input type="text" value="0"/>	Skygge til venstre, °
<input type="text" value="0"/>	Skygge til højre, °
<input type="text" value="0.1"/>	Peak Power (RS), kW/m <sup>2</sup>
<input type="text" value="0.75"/>	System virkningsgrad (Rp), -

Figur 21. Be06 inddata for solcelleanlæg.

### 3.3 Visualisering

Nedenfor er vist en række visualiseringsbilleder af bygning D's udtryk før og efter renovering – facader og hele bygningen set fra nordøst. Billederne til højre viser efter situationen, hvor der ses anvendelse af udvendig solafskærmning, som kunne blive relevant ved kombination af energibesparende tiltag til lavenerginiveau for at undgå overophedning - f.eks. ved udvendig facadeisolering med reduktion af udhænget. En alternativ mulighed for solafskærmning er solafskærmende energiglas suppleret med indvendig gardiner/rullegardiner.



## 4 Forslag til energirenovering

I det følgende undersøges konsekvenserne af de energibesparende tiltag foreslået i kapitel 3 – både de energimæssige og de økonomiske konsekvenser.

For at kunne vurdere tiltagene enkeltvis beregnes først energibesparelsen for de enkelte tiltag og derefter sammensættes tiltagene for at bringe bygningens energibehov ned på henholdsvis BR08, lavenergiklasse 2 og lavenergiklasse 1 niveau.

### 4.1 Enkelttiltag

Enkelttiltagene vil i det følgende blive opdelt i tre grupper: tiltag vedrørende klimaskærm (K1-K5), installationer (I1-I8) og vedvarende energi (V1-V2).

#### 4.1.1 Definition af tiltag

##### 4.1.1.1 Klimaskærm

- K1: Efterisolering af loftet (afsnit 3.1.1): 400 mm isolering i alt, U-værdi på 0,10.
- K2: Udvendig efterisolering af facader og gavle (afsnit 3.1.2): 250 mm isolering: U-værdi 0,15 ;  $\Psi_f = 0,30$ , samt efterisolering af fundamenter med ændret fundamentslinietab fra 0,8 til 0,3 W/mK (afsnit 3.1.3)
- K3: Skift til energivinduer med 2-lags energiruder (afsnit 3.1.4):  $U_w = 1,40 \text{ W/m}^2\text{K}$  ;  $g_w = 0,49$  ;  $E_{ref} = -30 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$ .
- K4: Udskiftning til lavenergivinduer med 3-lags energiruder (afsnit 3.1.4):  $U_w = 0,80 \text{ W/m}^2\text{K}$  ;  $g_w = 0,42$  ;  $E_{ref} = 10 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$ .
- K5: Indvendig efterisolering af gulve (afsnit 3.1.5): 30 mm vakuum isolering, U-værdi på 0,12 med ændret fundamentslinietab fra 0,8 til 0,5 W/mK (afsnit 3.1.3)

##### 4.1.1.2 Installationer

- I1: Udskiftning af to eksisterende gaskedler til én ny kondenserende kedel (afsnit 3.2.1)
- I2: Omlægning til fjernvarme med nye rørtemperaturer på 70/40°C (afsnit 3.2.1)
- I3: Nyt radiatoranlæg med varmfordelingsrør indenfor klimaskærmen og nye rørtemperaturer på 55/40°C (afsnit 3.2.2)
- I4: Nyt gulvvarmeanlæg (med fjernelse af radiatoranlæg) i kombination med efterisolering af terrændæk - tiltag K5 - og nye rørtemperaturer på 35/30°C (afsnit 3.2.2) med ændret fundamentslinietab fra 0,8 til 0,5 W/mK (afsnit 3.1.3) og samt ændring af temperaturfaktorer for terrændæk (0,7 til 1,0) og fundamenter (1,0 til 1,3)
- I5: Nye rør til varmt brugsvand indenfor klimaskærmen (afsnit 3.2.3)
- I6: Udskiftning af cirkulationspumpe til automatisk reguleret sparepumpe (afsnit 3.2.2)
- I7: Installation af mekanisk balanceret ventilation med varmegenvinding (afsnit 3.2.4)
- I8: Udskiftning til nyt lavenergibelysningsanlæg (afsnit 3.2.5)

##### 4.1.1.3 Vedvarende energi

- V1: Installation af solvarmeanlæg til brugsvandsopvarmning (afsnit 3.2.6)
- V2: Installation af solcelleanlæg (afsnit 3.2.7)

#### 4.1.2 Energibesparelser ved enkelttiltag

Tabel 3 og Figur 22 viser energibesparelsen ved ovennævnte tiltag, hvis de indføres som eneste tiltag, dvs. alt andet lige. Ved nogle tiltag kan besparelser simpelt adderes for at få energibesparelsen ved indførelse af flere tiltag, f.eks. nye vinduer, mekanisk ventilation, solvarme og solceller, mens andre tiltag er afhængige af hinanden, f.eks. udvendig efterisolering af ydervæge, fundamenter, terrændæk og varmepumpe, varmfordelingsanlæg og varmepumpe. Men resultaterne giver en idé om, hvordan energitiltagene kan grupperes for at opnå den ønskede energimæssige målsætning, f.eks. lavenergiklasse 1 niveau.

Tabel 3. Årlige energibehov og energibesparelser for enkelttiltag.

Energibesparende tiltag	Energibehov for bygningen	Energibesparelse ift. i dag
	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>
Eksisterende bygning	279.6	-
K1	266.7	12.9
K2	249.7	29.9
K3	254.6	25
K4	239.5	40.1
K5	260.3	19.3
I1	258.3	21.3
I2	258.9	20.7
I3	243.2	36.4
I4	230.4	49.2
I5	243.4	36.2
I6	275.8	3.8
I7	262.5	17.1
I8	248.6	31
V1	274.2	5.4
V2	250.0	29.6

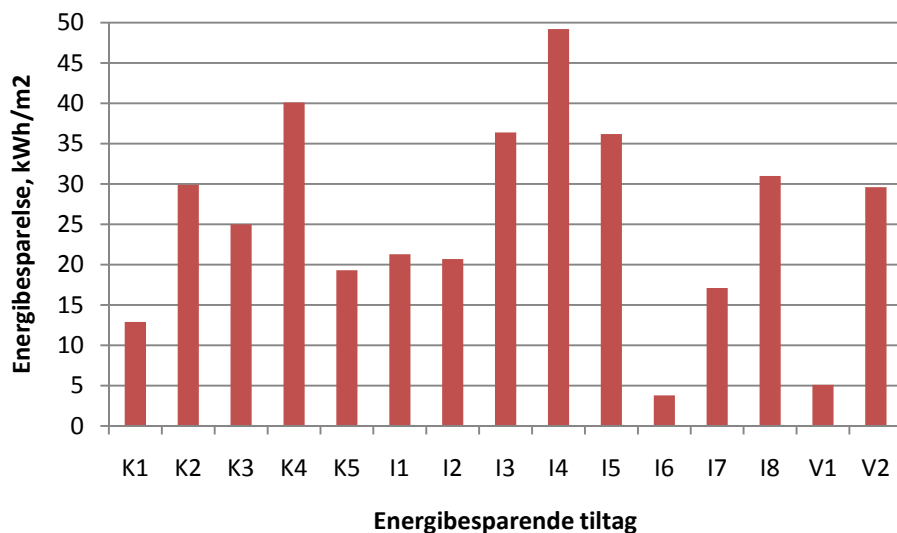
De største energibesparelser opnås ved efterisolering af ydervægge (K2) og vinduer (K3/K4) eller installation af gulvvarmeanlæg inkl. efterisolering af gulvet (I4). Store besparelser opnås også ved omlægning til fjernvarme (I2), installation af nye varmfordelingsrør (I3) og rør til varmt brugsvand (I5) indenfor klimaskærmen samt nyt belysningsanlæg (I8). Udskiftning af cirkulationspumpe (I6) samt installation af solvarmeanlæg til brugsvand (V1) giver den mindste besparelse. Installation af mekanisk ventilation (I7) giver moderat energibesparelse, men vil være et attraktivt tiltag via de resulterende indeklimafordele mv.

Installation af et større solceller (100 m<sup>2</sup>) giver som ventet en stor energibesparelse, men bør kun ses som en mulighed for at nå et meget lavt samlet energibehov, da tiltaget er dyrt i forhold til besparelsen.

En sammenligning af K3 og K4 viser, at skift til lavenergivinduer frem for energivinduer giver en ekstra energibesparelse på 15 kWh/m<sup>2</sup>, hvilket faktisk er lidt mere end besparelsen ved en højisolering af loftet. Dette hænger naturligvis sammen med at loftet tidligere er blevet efterisolaret (selvom den delvist er defekt eller mangler).



En sammenligning af K5 og I4 (I4 er en kombination af K5 og I3) viser, at hvis højisolering af terrændækket, oplagt kombineres med installation af et gulvvarmeanlæg, kan der opnås en besparelse som er ca. 2,5 gange større. Dette skyldes primært, at det betydelige ikke-nyttiggjort varmetab fra det 2-strengede radiator anlæg med varmefordelingsrør fremført på loftet næsten elimineres ved tiltaget.



Figur 22. De årlige energibesparelser, som tiltagene giver anledning til.

Man skal være forsigtig med at vurdere de enkelte tiltag alene. Umiddelbart er det ikke så attraktivt at efterisolere loftet, men hvis der alligevel skal installeres et ventilationsanlæg er der behov for at føre kanaler rundt til de enkelte klasselokaler, hvilket nemmest gøres på loftet, og så var det relevant at indbygge dem i en efterisolering af loftet, der trods alt kun kræver en beskednen investering.



## 4.2 Kombination af tiltag

Ingen tiltag kan alene bringe bygningen på BR08 niveau. For at komme på BR08 niveau skal bygningens energibehov nedbringes fra ca. 280 til 98,5 kWh/m<sup>2</sup>. Dette kræver vidtgående tiltag. For at nå ned på lavenergiklasse 1 niveau er der behov for alle tiltag inkl. isolering af gulvet og nyt belysningsanlæg.

Tiltagene kan ikke udelukkende prioriteres på baggrund af energibesparelsen. Der er behov for at se på komfort, økonomi og ejerens ønsker til udseende og funktion.

Ejeren (kommunen) har et ønske om at konvertere til fjernvarme, at udskifte varmeanlægget og at forbedre indeklimaet via tætning og isolering af klimaskærmen (ydervægge og vinduer). Man har ikke indvendinger mod udvendig facadeisolering. De betydelige varmetab fra installationer bør naturligvis elimineres

En oplagt grundpakke er derfor:

K1 (ekstra loftisolering)

K2 (udvendig efterisolering af ydervægge)

K3 eller K4 (udskiftning til energi- eller lavenergivinduer)

I2 (omlægning til fjernvarme)

I3 (omlægning af varmeanlæg med nye radiatorer og varmerør indenfor klimaskærmen)

I5 (nye rør til cirkulation af varmt brugsvand indenfor klimaskærmen)

I6 (ny cirkulationspumpe – sparepumpe)

I7 (mekanisk ventilation)

Installation af mekanisk ventilation (I7) giver incitament til at efterisolere og tætne hele loftet (K1), inklusiv ventilationskanalerne i loftrummet samt installation af de omtalte særlige akustiklofter med integreret ventilation til indblæsning af frisk luft uden trækgener.

Et nyt belysningsanlæg (I8) er et videregående tiltag, som har sammenhæng med mekanisk ventilation og nye loftplader. En moderne energieffektiv belysning er nødvendigt for at bringe bygningen på lavenergyniveau.

#### 4.2.1 Overholdelse af BR08 krav til nye huse

Det undersøges i første omgang om ovenstående grundpakke kan bringe bygningen ned på BR08-niveau, dvs. 98,5 kWh/m<sup>2</sup>.

BR08 (K3): K1+K2+K3+I2+I3+I5+I6+I7

BR08 (K4): K1+K2+K4+I2+I3+I5+I6+I7

De to kombinationer bringer huset energibehov ned på:

BR08(K3): 108,0 kWh/m<sup>2</sup> og

BR08(K4): 98,6 kWh/m<sup>2</sup>

BR08 (K3) bringer ikke huset ned på BR08 niveau. Det er oplagt og nødvendigt at opgradere K3 til K4 - altså lavenergivinduer frem for almindelige energivinduer - når nu vinduerne alligevel udskiftes, hvilket så netop bringer bygningen på BR08 niveau (se også Figur 23).

Nøgletal, kWh/m<sup>2</sup> år

Energiramme

BR: 98,5

Klasse 2: 72,5

Klasse 1: 51,7

Samlet energibehov

98,6

Bidrag til energibehovet

Varme	38,1
El til bygningsdrift	24,2 *2,5
Overtemp. i rum	0,0

Netto behov

Rumopvarmning	26,4
Varmt brugsvand	11,6
Køling	0,0

Udvalgte elbehov

Belysning	19,1
Opvarmning af rum	0,0
Opvarmning af vbv	0,5
Varmepumpe	0,0
Ventilatorer	4,2
Pumper	0,8
Køling	0,0
Totalt elforbrug	48,5

Varmetab fra installationer

Rumopvarmning	0,0
Varmt brugsvand	6,3

Ydelse fra særlige kilder

Solvarme	0,0
Varmepumpe	0,0
Solceller	0,0

Figur 23. Nøgletal for Be06 beregning efter renovering til nybyg niveau (BR08)

En sammenligning af K3 og K4 viser at der opnås en energibesparelse på ca. 10 kWh/m<sup>2</sup> ved opgradering til lavenergivinduer, mens besparelsen var 15 kWh/m<sup>2</sup>, hvis udgangspunktet var den eksisterende og dårligt isolerede bygning. Dette skyldes en kombination af en kortere varmesæson og mindre udnyttelse af varmetilskud. Dette illustrerer det faktum at summen af enkeltbesparelser altid er større end når de kombineres.

Det betydelige elforbrug til belysning og ingen efterisolering af gulvet gør det altså svært at opnå BR08 niveau, hvis ikke ret vidtgående klimaskærmstiltag benyttes på facader og tag.

#### 4.2.2 Lavenergiklasse 2

Beregningerne af enkelttiltag indikerer at et nyt belysningsanlæg (I8) kan bringe bygningen under rammen for lavenergiklasse 2 på 72,5 kWh/m<sup>2</sup>:

LE2a: BR08(K4) + nyt belysningsanlæg (I8-K) med kontinuert autom. styring	68,4 kWh/m <sup>2</sup>
LE2b: BR08(K4) + nyt belysningsanlæg (I8-A) med autom. on-off styring	71,7 kWh/m <sup>2</sup>

Det ses, at et nyt moderne og energieffektivt belysningsanlæg - installeret effekt på 6 W/m<sup>2</sup> og kontinuert automatisk regulering efter dagslyset - alene kan bringe bygningen på lavenergiklasse 2 (se Figur 24). Der kan eventuelt investeres i en mindre avanceret on-off regulering efter dagslyset og fortsat holde lavenergiklasse 2.

Et 10 kW<sub>p</sub> solcelleanlæg (V2) vil alene kunne reducere energibehovet (69,0 kWh/m<sup>2</sup>) med det samme som et nyt belysningsanlæg, men det vil formentlig være noget dyrene i anskaffelse.

Nøgletal, kWh/m <sup>2</sup> år	
Energiramme	
BR: 98,5	Klasse 2: 72,5      Klasse 1: 51,7
Samlet energibehov	
68,4	
Bidrag til energibehovet	
Varme	46,6
El til bygningsdrift	8,7 *2,5
Overtemp. i rum	0,0
Netto behov	
Rumopvarmning	34,9
Varmt brugsvand	11,6
Køling	0,0
Udvalgte elbehov	
Belysning	3,6
Opvarmning af rum	0,0
Opvarmning af vbv	0,5
Varmepumpe	0,0
Ventilatorer	4,2
Pumper	0,8
Køling	0,0
Totalt elforbrug	33,0
Varmetab fra installationer	
Rumopvarmning	0,0
Varmt brugsvand	6,3
Ydelse fra særlige kilder	
Solvarme	0,0
Varmepumpe	0,0
Solceller	0,0

Figur 24. Nøgletal for Be06 beregning efter renovering til lavenergiklasse 2

### 4.2.3 Lavenergiklasse 1

Bygningen kan bringes i nærheden af lavenergiklasse 1 ved etablering af et nyt gulvvarmeanlæg i kombination med efterisolering af terrændæk med vakuum isolering og lille byggehøjde (I4). Men for at bringe bygningen inden for ramme af lavenergiklasse 1 på  $51,7 \text{ kWh/m}^2$ , er det relevant at reducere varmebehovet til brugsvand ved installering af et solvarmeanlæg (V1). Reduktion af varmetabet fra brugsvandsrør ved yderligere isolering giver ikke et væsentligt bidrag. Solvarme er ikke besparelse nok, men det er muligt at ”komme i mål” med f.eks. en lidt bedre isolering af terrændæk ( $U = 0,10$ ) (I4+)

LE1a:	LE2a + gulvisolering og -varme (I4)	57,1 $\text{kWh/m}^2$
LE1b:	LE2a + gulvisolering og -varme (I4) + solvarme (V1)	53,2 $\text{kWh/m}^2$
LE1c:	LE2a + gulvisolering og -varme (I4+) + solvarme (V1)	51,6 $\text{kWh/m}^2$

Kombination LE1c resulterer i et energibehov på  $51,6 \text{ kWh/m}^2$ , svarende til lavenergiklasse 1 (se Figur 25).

Der er ifølge Be06 beregningen ingen problemer med overtemperaturer, hvilket umiddelbart er overraskende. Forudsættes f.eks. samme g-værdi for lavenergivinduerne som for de almindelige energivinduer ( $0,63$  isf  $0,50$ ) øges energibehovet til  $54,8 \text{ kWh/m}^2$ . Den lavere g-værdi for 3-lags energiruder er i dette tilfælde beregningsteknisk set en fordel.

Nøgletal, $\text{kWh/m}^2 \text{ år}$	
Energi ramme	
BR: 98.5	Klasse 2: 72.5      Klasse 1: 51.7
Samlet energibehov	
	51.6
Bidrag til energibehovet	
Varme	29.6
El til bygningsdrift	8.8 *2,5
Overtemp. i rum	0.0
Netto behov	
Rumopvarmning	22.0
Varmt brugsvand	11.6
Køling	0.0
Udvalgte elbehov	
Belysning	3.6
Opvarmning af rum	0.0
Opvarmning af vbv	0.5
Varmepumpe	0.0
Ventilatorer	4.2
Pumper	0.9
Køling	0.0
Totalt elforbrug	33.1
Varmetab fra installationer	
Rumopvarmning	0.0
Varmt brugsvand	6.3
Ydelse fra særlige kilder	
Solvarme	4.3
Varmepumpe	0.0
Solceller	0.0

Figur 25. Nøgletal for Be06 beregning efter renovering til lavenergiklasse 1

## 5 Økonomiberegninger

### 5.1 Introduktion

I det følgende afsnit vurderes økonomien for de pågældende energibesparende tiltag, som er foreslået. Formålet er at beregne den økonomiske effekt af tiltagene i forhold til investeringen, og som kan bruges til at holde tiltagene op imod hinanden. Der vil blive beregnet tre forskellige økonomiske indikatorer, som er energispareprisen, den simple tilbagebetalingstid og rentabilitetsfaktoren. Disse vil blive uddybet nedenfor.

Som udgangspunkt for prissætning anvendes V&S prisbøger samt erfaringstal, og for energibesparelserne anvendes beregninger fra parametervariationer i Be06. Fremgangsmåden er forsøgt så simpel som muligt og er ment som generelle indikatorer af tiltagenes økonomi både som enkelttiltag og som samlede tiltag. I alle tilfælde er det vigtigt at pointere, at der er tale om prisoverslag, og at en mere detaljeret prisanalyse i form af f.eks. tilbud fra håndværkere bør anvendes i konkrete tilfælde, hvor også bygningens stand og faktiske energiforsyning spiller ind. Yderligere er det også vigtigt at pointere, at beregningerne af energibesparelserne er begrænset til de forhold som kan bestemmes ud fra Be06.

### 5.2 Beregningsgang

#### 5.2.1 Den simple tilbagebetalingstid

Den "simple tilbagebetalingstid" er som navnet antyder en simpel beregning af det antal år, der går før investeringen i energibesparelsetiltaget er betalt tilbage udelukkende ved den årlige energibesparelse. Denne beregningsmetode tager altså hverken højde for inflation, renteudgifter på evt. lån, den tekniske levetid af tiltaget eller ændringer i energiprisen. Til gengæld er det et begreb, der er let at forstå og at forholde sig til for udenforstående og lægmænd. Risikoen er dog, at en tilbagebetalingstid på mere end 10-15 år hurtigt kommer til at lyde uoverskuelig og tiltaget derfor ikke bliver gennemført, selvom tiltaget har en levetid på det dobbelte antal år. Ifølge Energimærkningshåndbogen vil et forslag være rentabelt, hvis den simple tilbagebetalingstid er mindre end levetiden på arbejdet.

Den simple tilbagebetalingstid er defineret som angivet nedenfor:

$$T = \frac{I}{B}$$

Hvor:

T er den simple tilbagebetalingstid i år

I er investeringen i DKK

B er den årlige energibesparelse i DKK/år

Der er ikke regnet med fradrag for årlige merudgifter til vedligehold.

#### 5.2.2 Rentabilitetsfaktoren

Rentabilitetsfaktoren bestemmes ud fra et tiltags tekniske levetid, den årlige energibesparelse og investeringen. Rentabilitetsfaktoren er tæt knyttet til den simple tilbagebetalingstid, som det fremgår af nedenstående formel:

$$R = \frac{n \cdot B}{I} (> 1,33)$$

Hvor:

R er rentabilitetsfaktoren

n er tiltagets tekniske levetid, år

B er energibesparelsen, DKK/år

I er investeringen i DKK

Rentabilitetsfaktoren kendes fra Bygningsreglementet. I BR2010 defineres et energibesparende tiltag som værende rentabelt, hvis rentabilitetsfaktoren er større end 1,33, svarende til at tiltaget skal være tilbagebetalt indenfor 75 % af den forventede levetid.

### 5.2.3 Energispareprisen

Den sidste af de tre økonomiske indikatorer er "energispareprisen". Denne udtrykker udgiften til energibesparelser i forhold til prisen for energi, dvs. prisen for at spare 1 kWh.

Energispareprisen tager i modsætning til den simple tilbagebetalingstid og rentabilitetsfaktoren, højde for renteudgifter på lån, udvikling i energipris, levetid af tiltaget samt udgifter til mervedligehold. Er energispareprisen for et givent tiltag lavere end prisen på 1 kWh på det givne tidspunkt, er det altså billigere at energirenovere end at lade være. Da nedbringelse af energiforbruget for en bygning som regel opnås ved en kombination af forbedrede delkonstruktioner og -løsninger, ligger udfordringen i at finde den optimale kombination af deltiltag, der billigst muligt sikrer en overholdelse af energirammen. Dette gøres ved at vælge en kombination af tiltag, der har en energisparepris i samme størrelsesorden.

Energispareprisen beregnes efter følgende udtryk:

$$ESP = \frac{\frac{n}{n_t} a(n, r) I_{\text{tiltag}} + V_{\text{årlig}}}{\Delta E_{\text{varme, årlig}} + 2,5 \cdot \Delta E_{\text{el, årlig}}}$$

Hvor:

ESP er energispareprisen, [DKK/kWh]

n er den økonomiske levetid af et lån, [år]

$n_t$  er tiltagets tekniske levetid, [år]

$a(n, r)$  er annuitetsfaktor, [-]<sup>1</sup>

$I_{\text{tiltag}}$  er udgiften til investeringen, [DKK]

$V_{\text{årlig}}$  er den årlige udgift til mervedligehold, [DKK/år]

$\Delta E_{\text{varme, årlig}}$  er den årlige varmebesparelse [kWh/år]

$E_{\text{el, årlig}}$  er den årlige elbesparelse, [kWh/år]

### 5.2.4 Energirenoveringsfaktoren

Alle tre økonomiske indikatorer indeholder investeringen for tiltaget. Men for at vurdere investeringen fra et energimæssigt synspunkt introduceres et yderligere begreb, nemlig "energirenoveringsfaktoren".

Energirenoveringsfaktoren angiver hvor stor en del af arbejdet eller investeringen, der kan tilskrives en egentlig energirenovering og hvor stor en del, der er vedligehold eller ville være

---

<sup>1</sup> Faktor til omregning af investeringen til årlig ydelse på lån over n år

blevet gennemført alligevel af andre årsager. En faktor på 1 svarer til 100 % energirenovering og en faktor på 0 svarer til udelukkende vedligehold eller andre årsager. Vurderingen af denne faktor må laves for hvert enkelt tiltag af bygningssejeren og er pga. denne individuelle vurdering ikke nødvendigvis en fast defineret størrelse, men kan afvige fra gang til gang. Som eksempel på fastsættelse af faktoren kan gives en udskiftning af vinduer, inden de er udtjente. Er de f.eks. vurderingsmæssigt halvvejs i deres levetid, altså ca. 10 år, vil energirenoveringsfaktoren kunne sættes til 0,5. Som et andet eksempel kan gives udskiftning af udtjente vinduer til vinduer, der er energimæssigt bedre end Bygningsreglementet kræver, og derfor er 20 % dyrere. Her vil energirenoveringsfaktoren kun være 0,2. Men i det faktiske tilfælde, kan bygningssejeren lægge andre forhold til grund for vurderingen og derfor vælge en anden faktor.

I beregningerne multipliceres energirenoveringsfaktoren på den beregnede samlede omkostning for et tiltag. Det er dermed kun den energimæssige del af investeringen, der medtages i beregningen af de økonomiske indikatorer. Dette er med til at sikre, at ikke hele udgiften til renoveringen kommer til at ligge til grund for beregningen af de økonomiske indikatorer, men kun den del af udgiften, der går til den egentlige energibesparelse.

### **5.3 Beregningsforudsætninger**

#### **5.3.1 Prissætning**

Prissætning af udgifterne til renoveringsarbejder er en kompleks sag, da prisen afhænger af en lang række faktorer, herunder geografisk placering, originalitet af arbejdet, bygningens tilstand samt udbud og efterspørgsel. Til prissætningen af renoveringstiltagene i denne rapport er anvendt V&S-prisbøger for Renovering og Drift 2010 samt Husbygning 2010, da dette er den lettest tilgængelige metode og anerkendt som rimelig og repræsentativ for virkeligheden. Herudover er de beregnede værdier suppleret med erfaringstal, hvor dette vurderedes som mest rimeligt.

Det har dog kun i enkelte tilfælde været muligt at finde prisen på de nøjagtige tiltag, da prisbøgerne kun inkluderer almindeligt forekommende håndværksmæssige opgaver. Som et eksempel kan nævnes, at prisbøgerne opgør priser på efterisolering i tykkelser fra 50-195 mm, og i et sådant tilfælde har det været nødvendigt at ekstrapolere og/eller revurdere den opgjorte kvadratmeterpris, da der i rapporterne i projektet typisk arbejdes med større isoleringstykkelser end 195 mm for at opnå et tilstrækkeligt lavt energiforbrug.

Denne metode indeholder nødvendigvis en række usikkerheder, men må dog anses som værende den mest rigtige. Priserne er inkl. udførelse og afskaffelse af evt. materiale til deponering. Derimod indeholder priserne ikke udgifter til etablering af arbejdsplads, udgifter til evt. skjult ekstraarbejde, der først viser sig i udførelsesfasen samt tilsvarende forhold. Ligeledes er priserne beregnet ud fra den viden, der er opsamlet i forbindelse med udarbejdelsen af rapporten. Der er således ikke indhentet tilbud fra håndværkere på udførelse af arbejdet.

I Tabel 4 er vist udgangspunktet for de beregninger, der gennemføres. Som det er beskrevet i diskussionen nedenfor, vil der ikke blive gået i detaljer med de økonomiske inputparametre. I stedet henvises til (Tommerup og Svendsen, 2008) og (Petersen og Svendsen, 2010) for yderligere dokumentation af diskussion. Der er dog angivet så mange oplysninger, at læseren

selv kan gennemføre beregninger med egne data som udgangspunkt - f.eks. andre energipriser, levetider og renteforudsætninger.

Tabel 4. Beregningsforudsætninger

Symbol	Betegnelse	Værdi	Enhed
n	Økonomisk levetid på lån	30	år
r	Realrente	2,5	%
e	Udvikling i energipris (ud over den generelle inflation)	1,5	%
a(n,r)	Annuitetsfaktor	0,038748	-
E <sub>el</sub>	El-pris	2,0	DKK/kWh
E <sub>varme</sub>	Varmepris (naturgas)	0,8	DKK/kWh

### 5.3.2 Teknisk levetid

Den tekniske levetid af tiltagene er som udgangspunkt baseret på BR2010. Dog er der i visse tilfælde vurderet en anden levetid. Dette er specifikt angivet i disse tilfælde.

### 5.3.3 Vedligehold

Vedligeholdet er i beregningerne antaget som et "mervedligehold". I de tilfælde hvor der er tale om udskiftning af et gammelt anlæg med et nyt (f.eks. naturgasfyr til varmpumpe) antages det, at mervedligeholdelsen er kr. 0 - i nogle tilfælde vil det formentlig være negativt, hvis et gammelt anlæg erstattes med et nyt medmindre vedligehold. I det tilfælde, at der installeres et helt nyt anlæg (f.eks. solfanger, solceller og balanceret mekanisk ventilation) tages udgiften til vedligeholdet med, da der ikke i forvejen er nogen vedligeholdelsesudgifter på et anlæg, der ikke er installeret. Når et nyt anlæg introduceres er vedligeholdelsesudgifterne et reelt mervedligehold. I alle tilfælde har vedligeholdet en stor indflydelse på energispareprisen.

### 5.3.4 Energimæssige forhold

Energiberegningerne er foretaget i Be06, som således anvendes til at bestemme besparelsen ved gennemførelse af tiltagene. I beregningerne anvendes så vidt muligt standardforudsætninger. Det har dog den konsekvens, at visse beregninger ikke er realistiske. F.eks. antages en indetemperatur i opvarmningssæsonen på 20 °C og ikke de 21 °C til 22 °C, som typisk er tilfældet. Da besparelserne regnes relativt i forhold til hinanden, vil dette dog ikke have så stor indflydelse, som hvis værdierne blev anvendt som absolutte energiforbrug.

I de praktiske beregninger er der udført én beregning pr. tiltag, som gennemføres som en uafhængig parametervariation, der sammenlignes med udgangspunktet. Herudover gennemføres én beregning pr. løsningskombination af tiltag, hvor alle enkelttiltagene er medregnet. Dette skyldes, at visse forslag ikke er uafhængige af hinanden.

### 5.3.5 Energipriser

I beregningerne benyttes de faktiske energipriser for den typiske brug af bygningen.



## 5.4 Prissætning af tiltag

I Tabel 5 angives udgiften til det energibesparende tiltag, tilhørende energibesparelser, den resulterende energisparepris, rentabilitetsfaktor samt simple tilbagebetalingstid. I Tabel 5 er de forskellige energibesparende tiltag angivet med samme kode som i forrige kapitel.

Tabel 4 viser de benyttede referencedata til beregningerne.

Tabel 5 viser indledningsvis de 15 individuelle forslag enkeltvis. Herefter vises de tiltag, der skal gennemføres, for at bygningen kommer ned på hhv. BR08-krav og lavenergiklasse 2 og 1. Overtemperaturer i rum (f.eks. 3 kWh/m<sup>2</sup> for eksisterende bygning) er ikke vist i tabellen, så derfor er varmebesparelse plus 2,5 x elbesparelse ikke lig med energirammebesparelsen. Bemærk at angivelse "BR08 (k3)" henviser til vinduestiltag k3 (almindelige energivinduer), mens "BR08 (k4)" henviser tilsvarende til vinduestiltag k4 (lavenergivinduer). BR08 (K3) bringer ikke huset ned på BR08 niveau. Det er oplagt og nødvendigt at opgradere K3 til K4 - altså lavenergivinduer frem for almindelige energivinduer - når nu vinduerne alligevel udskiftes, hvilket så netop bringer bygningen på BR08 niveau. I de to nederste linjer er vist de samlede tiltag, der opfylder kravene til lavenergiklasse 2 og 1.

Betragtes tiltagene enkeltvis ses det, at kun få tiltag ikke er rentable set fra en rent økonomisk vinkel. Kun 2 af de 15 forslag er direkte urentable. Der kan være flere årsager til dette. For det første har skolen som udgangspunkt et forholdsvist højt energiforbrug, og derfor har tiltagene stor effekt. For det andet forsynes skolen med naturgas, som er dyrere end fjernvarme og derfor bliver incitamentet til at spare på energien større. For det tredje er energirenoveringsfaktoren vurderet at ligge på et relativt lavt niveau for de fleste tiltag, hvilket er et udtryk for at bygningen er nedslidt og trænger til renovering.

Det ses, at udvendig facadeisolering er en rentabel løsning, hvis der forudsættes en energirenoveringsfaktor på 0,5. Halvdelen af investeringen er altså henført til renovering af ydervægselementerne, idet der behov for tiltag til hindring af en nedbrydning af forpladen (beton med frilagte sten), hvor der nogle steder ses at armeringen er rustet igennem. Vinduerne trænger til renovering, så der er også regnet med relativ lav energirenoveringsfaktor ved udskiftning til nye vinduer. Både skift til almindelige energivinduer og lavenergivinduer er rentabelt. Indvendig gulvisolering med højisolerede materialer med lille byggehøjde er næsten rentabelt, hvis det forudsættes at 20 % af anlægsudgiften antages henført til almindelig vedligehold og renovering.

Alle installationstiltag relateret til varmeanlægget (I1-I6) har særdeles god rentabilitet, hvilket også hænger sammen med en lav energirenoveringsfaktor. Installation af mekanisk ventilation er ikke en rentabel løsning på trods af en energirenoveringsfaktor på 0,5, som skyldes et behov for en forbedring af komfort og indeklima i bygningen. Her skal det nævnes, at levetiden er sat til kun 20 år. Den høje energisparepris skyldes dels den relativt korte levetid, og dels et markant elforbrug til drift af anlægget og indregnede vedligeholdelsesudgifter. Ventilationstiltaget giver i høj grad en forbedret komfort og indeklima til glæde for lærer og elever. Derfor bør ventilationstiltag ikke strande på "dårlige" økonomiberegninger. Der er desuden regnet på installation af et nyt energieffektivt belysningsanlæg til erstatning for et ældre anlæg med stort elforbrug. Økonomien i et sådan anlæg er ikke overraskende attraktiv.

Ser man på solenergi tiltagene, som begge er rent energimæssigt betingede, så er økonomien i solvarme akkurat rentabelt, mens solceller har lidt dårlige økonomi.

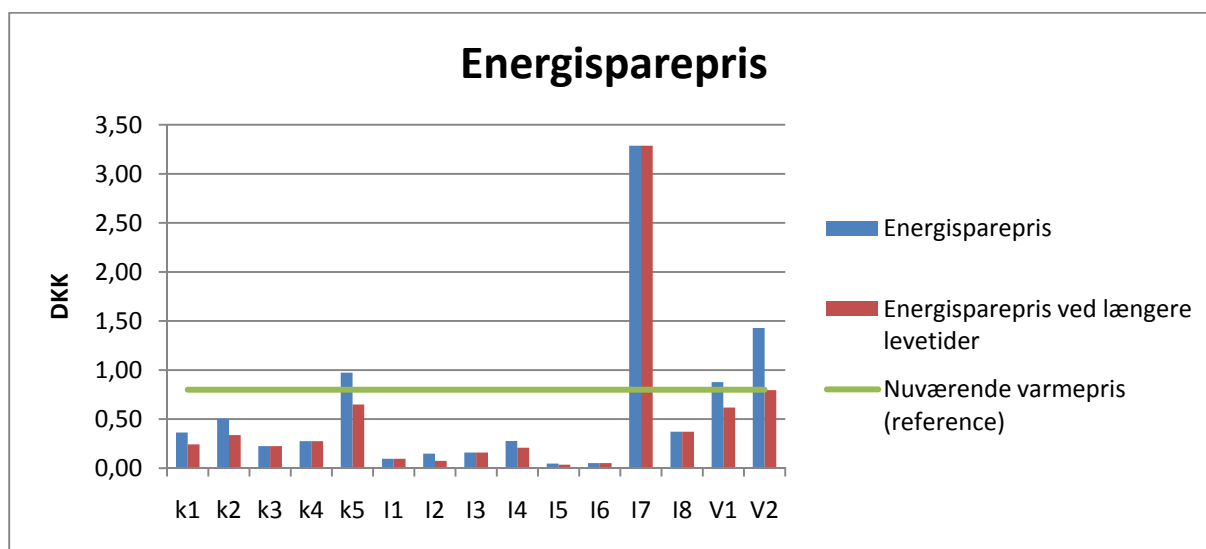
Tabel 5. Økonomidata for skolebygningen med et areal på 632 m<sup>2</sup>.

Tiltag	Investerings ekskl. moms (DKK)	Energirenoerings-faktor (-)	Heraf energirenoering (DKK)	Samlet energiramme (kWh/m <sup>2</sup> )	n <sub>t</sub> (teknisk levetid) (år)	Varmebesparelse (kWh/m <sup>2</sup> )	Elbesparelse (kWh/m <sup>2</sup> )	Energirammebesparelse (kWh/m <sup>2</sup> )	Energisparepris (kr./kWh)	Rentabilitetsfaktor (-)	Tilbagebetalingstid (år)
Eksisterende		-	-	279,6	-	-		-	-	-	-
k1	147.256	0,85	125.168	266,7	40	15,6	0,1	12,9	0,36	2,6	15,6
k2	760.045	0,50	380.023	249,7	40	34,1	0,2	29,9	0,51	2,0	21,7
k3	188.024	0,50	94.012	254,6	30	25,5	0,1	25,0	0,22	5,1	7,2
k4	277.010	0,60	166.206	239,5	30	36,8	0,1	40,1	0,28	4,6	8,9
k5	605.000	0,80	484.000	260,3	40	22,6	0,1	19,3	0,97	1,0	41,9
I1	66.600	0,25	16.650	258,3	20	20,2	0,5	21,3	0,10	16,3	1,6
I2	135.000	0,25	33.750	258,9	20	19,4	0,6	20,7	0,15	7,8	3,2
I3	379.188	0,25	94.797	243,2	30	36,2	0,1	36,4	0,16	7,3	5,1
I4	392.383	0,60	235.430	230,4	30	51,7	0,2	49,2	0,28	4,0	8,9
I5	101.120	0,25	25.280	243,4	30	33	0,1	36,2	0,05	27,2	1,5
I6	4.650	0,25	1.163	275,8	15	0	1,6	3,8	0,05	32,6	0,6
I7	892.640	0,50	446.320	262,5	20	22,6	-3,4	17,1	3,29	0,5	62,6
I8	170.008	0,50	85.004	248,6	15	-10,7	15,5	31,0	0,37	3,5	6,0
V1	44.310	1,0	44.310	274,2	20	5,5	-0,1	5,4	0,88	1,5	19,1
V2	406.000	1,0	406.000	250,0	20	0	11,8	29,6	1,43	0,9	34,2
BR08 (k3)	2.607.923	-	1.272.706	108,0	28	171,9	-1,3	171,6	0,52	2,4	14,4
BR08 (k4)	2.696.910	-	1.508.136	98,6	28	181,3	-1,3	181,0	0,58	2,2	16,1
LE2 (b):	2.866.918	-	1.593.140	71,7	27	174,0	12,4	207,9	0,59	2,2	14,4
LE1 (c):	3.323.230	-	1.872.880	51,6	28	189,8	14,1	228,0	0,58	2,1	15,9

Tabel 6. Forklaring på farvekoder i ovenstående tabel.

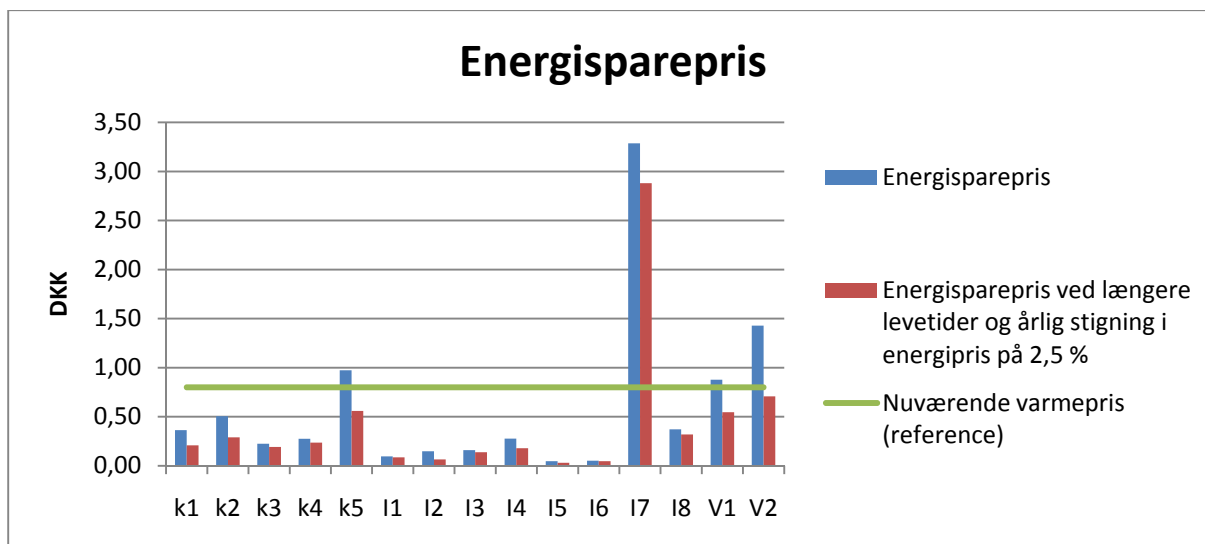
Farve	Kode	Referenceværdi	
	Faktoren er mere end 25 % bedre end referenceværdien	Rentabilitetsfaktor	1,33
	Faktoren ligger i intervallet ± 25 % af referenceværdien	Tilbagebetalingstid	Levetid
	Faktoren er mere end 25 % ringere end referenceværdien	Energisparepris	Varmepris: 0,8 DKK/kWh

Når de økonomiske parametre beregnes, tages udgangspunkt i tekniske levetider for de enkelte besparelsesforslag baseret på BR10, men disse levetider er ofte undervurderet. I Figur 26 er vist en sammenligning mellem den beregnede energisparepris samt en alternativ energisparepris, hvor visse af tiltagene antages at have en længere levetid. F.eks. antages efterisolering af bygningsdele at have en levetid på 60 år i stedet for 40 år, som angivet i BR10. Hvis tiltagene antages at have en længere levetid, hvori de er fuldt funktionsdygtige, vil økonomien i energirenoveringen blive bedre. Energispareprisen er den pris det koster, at spare 1 kWh og skal sammenlignes med den nuværende varmepris. Er energispareprisen lavere end den nuværende energipris, kan det altså bedre betale sig at energirenovere end at lade være. Den nuværende varmepris er i dette tilfælde 0,8 kr./kWh for naturgas. Figur 26 viser, at de forøgede levetid gør indvendig isolering af gulve (k5), solvarme (v1) og solceller (v2) rentable samt forbedre økonomien i allerede rentable tiltag.



Figur 26. Energisparepris beregnet på baggrund af tekniske levetider som opgivet i BR10 samt forlængede levetider.

I Figur 27 betragtes energispareprisen et bæredygtighedsscenario, hvor prisstigningstakten i energiprisen er lig med realrenten (dvs. 2,5 % p.a.). Dette betyder, at den fremtidige energibesparelse ikke bliver diskonteret, som det sker i ovenstående beregning af energispareprisen. Dette er ikke en urealistisk beregning, da mange af tiltagene som f.eks. isolering i realiteten ikke bliver udskiftet efter 30 år. Det er også meget sandsynligt, at energiprisen fremover vil stige med mere end 2,5 % årligt, som er baseret på prisstigninger i perioden 1990-2006 jf. Energistyrelsens Energipolitik 2006. Figur 27 viser, at den forøgede levetid og højere energipris igen gør efterisolering de ovennævnte tiltag rentable samt forbedre økonomien i allerede rentable tiltag.



Figur 27. Energisparepris beregnet på baggrund af tekniske levetider, som opgivet i BR10, samt forlængede levetider hvor der antages en årlig stigning i energiprisen på 2,5 % udover den generelle inflation.

På samme måde kan den simple tilbagebetalingstid diskuteres. Dette er vist i Tabel 7. Hvis tilbagebetalingstiden holdes op imod nogle længere levetider end de i BR10 opgivne, vil flere af tiltagene blive rentable. Tabel 7 viser, at med længere levetider ændres rentabilitetskategorien for den simple tilbagebetalingstid fra gul/rød til grøn for indvendig gulvisolering (k5) og solenergi (v1 og v2).

Tabel 7. Tilbagebetalingstid sammenlignet med BR10 levetider og alternative levetider. Grøn: Tilbagebetalingstiden er mere end 25 % kortere end levetiden. Gul: Tilbagebetalingstiden er lig levetiden  $\pm 25$  %. Rød: Tilbagebetalingstiden er mere end 25 % længere end levetiden.

	Levetid BR10	Tilbagebetalin gstad jf. BR10 levetider	Levetid Alternativ	Tilbagebetalin gstad jf. alt. levetider
K1: Efterisolering af loft	40	16	60	14
K2: Udv. efterisolering	40	22	60	19
K3: Udskiftning af vinduer	30	7	30	7
K4: Udskiftning af vinduer	30	9	30	9
K5: Indv. efterisolering	40	42	60	37
I1: Varmeprod. anlæg	20	2	20	2
I2: Varmeprod. anlæg	20	3	40	3
I3: Varmeanlæg	30	5	30	5
I4: Varmeanlæg	30	9	40	8
I5: Varmeanlæg	30	2	40	1
I6: Automatik til varmeanlæg	15	1	15	1
I7: Ventilation	20	63	40	63
I8: Belysningsarmaturer	15	6	15	6
V1: Solvarme	20	17	30	15
V2: Solceller	20	27	40	23

Ovenstående beregninger viser, at det er dyrt at energirenovere bygningen til lavenergiklasse 1. Mange tiltag er ganske attraktive, mens den samlede pakke er ganske dyr. Dette er som

forventet. Prisen for hele projektet er på ca. 3,3 mio. kr., hvoraf ca. 1,9 mio. kr. er energirelaterede ud fra energirenovationsfaktoren.

En vigtig pointe er, som beregningerne viser, at for at komme ned på bygningsreglementskravet vil omkostningerne være ca. 2,7 mio. kr., hvoraf 1,5 mio. kr. er relateret til energibesparelser. Merudgiften til opfyldelse af lavenergiklasse 1 i forhold til BR08-krav, er relativ beskeden, ca. 400.000 kr., hvor den totale udgift er 3,3 mio. kr. Sammen med besparelsen i energi, findes isoleret set en tilbagebetalingstid på 13 år.

Sidst men ikke mindst: det er vigtigt at pointere, at HVIS man gennemfører en gennemgribende renovering af bygningen, som har til formål at modernisere denne - også ud fra et energimæssigt synspunkt, vil ekstraudgiften til en fremtidssikring i form af en bygning, som lever op til lavenergiklasse 1, isoleret set være en god forretning.

## **5.5 Diskussion**

Den økonomiske analyse af energirenoveringerne viser som forventet, at der er stor forskel i rentabiliteten mellem de enkelte tiltag. Økonomiske analyser er desuden generelt meget følsomme overfor input og forudsætninger, også når det gælder energirenovering.

For det første kan selve prissætningen være kompliceret, da priser på håndværkere og materialer varierer meget. Som nævnt tidligere har faktorer som geografisk placering, originalitet af arbejdet, bygningens tilstand samt udbud og efterspørgsel en indflydelse på prisen.

Bygningens energiforbrug inden renovering har ligeledes en stor indflydelse på de økonomiske analyser. Jo højere energiforbrug inden renovering, desto større årlig besparelse i energi og dertil medfølgende kortere tilbagebetalingstid på investeringen.

En tredje parameter, der påvirker de økonomiske analyser, er bygningens energiforsyningskilde og prisen herpå. Forsynes en bygning f.eks. med naturgas eller olie, vil den årlige energibesparelse typisk føre til større økonomiske besparelser end hvis bygningen er forsynet med fjernvarme, da prisen herpå kan være det halve af naturgas.

Derudover skal resultaterne fra de økonomiske indikatorer holdes op mod det faktum, at energipriserne formentlig vil stige mere end den generelle prisudvikling. Dette betyder f.eks., at den reelle tilbagebetalingstid i praksis vil blive mindre end den bliver beregnet til her, hvor dagens energipriser benyttes.

For det fjerde skal det nævnes, at løsningskombinationerne af de forskellige energibesparende tiltag i disse rapporter er sammensat efter at reducere bygningernes energiforbrug ned til lavenergiklasse 1 og ikke efter flest sparede kilowatt-timer i forhold til investeringen. Kombinationerne måske være sammensat mere optimalt i forhold til økonomien. F.eks. er det vigtigt at skelne i mellem varmebesparelser og elbesparelser, da primærenergifaktoren på el på 2,5 gør det mere "attraktivt" at spare på el end på varme. Denne forskel bliver kun større i BR10, hvor brug af fjernvarme i lavenergibyggeri "belønnes" med en primærenergifaktor på 0,8.

## 5.6 Konklusion

Langt de fleste energirenoveringer foretages mest økonomisk, når en bygning alligevel skal renoveres. Energirenoveringer er generelt rentable under de rette forudsætninger. Økonomien må dog vurderes via en parametervariation i hvert enkelt tilfælde, da økonomien som tidligere nævnt er meget følsom overfor vurderede levetider, samt fremtidige prisstigninger på energi.

Helt generelt kan man sige at:

- Hovedparten af de i rapporten foreslåede tiltag er rentable
- Beregningsresultaterne er generelt meget afhængige af de faktiske forudsætninger. Især er det vigtigt hvor stor en del af renoveringen, der skyldes nedslidning og hvor stor en del, som udelukkende relateres til energi. Overordnet er det tydeligt, at hvis der alligevel skal foretages en gennemgribende renovering, er ekstrainvesteringen i energibesparende tiltag isoleret set en god investering.
- I skolen er der et betydeligt efterslæb på renovering. Dette antages generelt at være tilfældet for danske folkeskoler, og beregningerne viser også, at en stor del af forslagene er rentable. Set i det lys er det vigtigt, at der sammen med en renovering også tænkes energi ind i projektet, da det isoleret set har en god tilbagebetaling.

## 6 Konklusion

Der er 1800 folkeskoler i Danmark med samlet etageareal på omkring 8 mio. m<sup>2</sup> og et samlet elevtal på 600.000. En betydelig del af disse kvadratmeter er såkaldte typeskoler fra 1960/70'erne. Mange folkeskoler er nedslidte, energiforbruget er stort og indeklimaet er dårligt, hvilket har væsentlig betydning for komfort, sundhed og indlæring, samt kommunernes driftsøkonomi.

Der er et stort energisparepotentiale og et behov for at vise, hvordan skolebygninger fra 1960/70'erne kan energirenoveres i form af en energimæssig fremtidssikring og samtidig sikring af gode og sunde indeklimaforhold. Der er derfor god grund til at undersøge, hvordan denne type skoler energimæssigt kan opgraderes til BR08, lavenergiklasse 2 eller 1 niveau.

I denne rapport er det med udgangspunkt i et konkret typeskolebygning fra 1970'erne undersøgt, hvordan det teknisk og økonomisk er muligt at gennemføre en vidtgående energirenovering.

Undersøgelsen viser, at intet enkelttiltag er i stand til at bringe bygningens energiforbrug ned på BR08-niveau. Undersøgelsen viser desuden, at for at nå BR08's lavenergiklasse 1 niveau er det nødvendigt med energiproduktion fra et solvarmeanlæg.

Økonomiberegningerne viser, at 12 ud af de foreslåede 15 energibesparende tiltag er økonomisk rentabel. Med længere levetider end angivet i BR08 bliver stort set alle tiltag rentable. Denne rentabilitet er for de fleste af tiltagenes vedkommende afhængig af, at en del af investeringen kan betragtes om almindelig vedligehold eller en foranstaltning som også forbedre komfort og indeklima.

Opgraderingen af bygningen til BR08's lavenergiklasse 1 niveau er økonomisk rentabel uanset hvilken af de tre anvendte økonomiværdier. Det er forudsat at energitiltagene gennemføres i forbindelse med gennemgribende renovering, hvor ca. 40 % af totaludgiften er renoveringsrelaterede. Det er altså i forbindelse med en opgradering af bygningen økonomisk fordelagtigt at gå hele vejen og fremtidssikre huset til BR08's lavenergiklasse 1 niveau.

Meget energirenovering strander i dag på økonomien, da andre faktorer som komfort, indeklima, mindre vedligehold, bedre fungerende bygning, fremtidssikring ofte ikke indgår i husejerens overvejelse, når energirenovering overvejes. Derfor gennemføres mange energirenoverende tiltag ikke, eller de blive gennemført til et lavere niveau, end kunne ønskes ud fra en samfundsmæssig synsvinkel om et energisystem uden forbrug af fossile energiresourcer.

Det bør derfor undersøges, hvilke motivationstiltag som kan udvikles og rettes mod kommunerne for at få dem til at gennemføre mere gennemgribende energirenovering end det i dag er tilfældet.

## 7 Referencer

Arbejdstilsynet 2009: AT-vejledning A.1.2 - Indeklima. <http://www.at.dk/REGLER/At-vejledninger-mv>.

Dansk Standard 2002: Beregning af bygningers varmetab. København, Dansk standard, DS-418:2002, 6. udgave.

DTU Byg 2010: Energirenovering af skole til lavenerginiveau. Eksamensprojekt på studieretning bygningsdesign, Hanne Bebe Madsen og Jakob Ernst Malmqvist.

EBST/Energistyrelsen 2009: Håndbog for Energikonsulenter 2008 - Version 3. FEM Sekretariatet

Erhvervs- og Byggestyrelsen 2007: Bygningsreglement 2008. København, Erhvervs- og Byggestyrelsen, 2007. ISBN 978-87-91340-88-8.

Petersen, S. og Svendsen, S., 2010. Cost of Conserved Energy method for economically optimised design of new buildings. Energy & Buildings (submitted Juni 2010).

Statens Byggeforskningsinstitut 2008: SBI-anvisning 213 - Bygningers energibehov. Søren Aggerholm, Karl Grau.

Tommerup, H. og Svendsen, S., 2008. Forslag til nye energikrav til eksisterende bygningers klimaskærm. DTU Byg sagsrapport SR-08-05.



Rapporten omhandler, hvordan man kan energirenovere en typisk typeskole bygning fra 1970'erne til bygningsreglementets minimumskrav til nye bygninger og til lavenerginiveau (klasse 2 og 1). Rapporten omfatter en detaljeret beskrivelse af den eksisterende eksempelbygning - i form af f.eks. konstruktioner, installationer, indeklimateforhold og energiforbrug - analyse af energirenoveringsmuligheder samt forslag til energirenovering i form af enkelttiltag og kombinationer af tiltag. Energiberegningerne er udført med programmet Be06.

Der redegøres også for den økonomiske effekt af tiltagene i forhold til investeringen.

**DTU Byg**  
**Institut for Byggeri og Anlæg**  
Danmarks Tekniske Universitet

Brovej, Bygning 118  
2800 Kgs. Lyngby  
Tlf. 45 25 17 00

[www.byg.dtu.dk](http://www.byg.dtu.dk)

**ISBN 9788778773036**  
**ISSN 1601-2917**